



Miguel Palos Pou
Sergio Forcen Ascensio
Barcelona, España
Enero 2016



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

Resumen

El objetivo base del proyecto es el estudio geológico del suelo marciano en concreto las formaciones estructurales en la superficie y la propuesta de un modelo de corteza a partir de una modelización de resistencia de materiales que justifique dichas estructuras. Se concluirá con un mapa geomorfológico de la corteza de marte. El trabajo en sí discutirá cuestiones científicas basándose en la observación de la topografía del planeta a excepción de la conclusión en la que química y física de la superficie serán entrelazadas por tal de aportar una propuesta ingenieril.

Abstract

The basic objective of the Project is the geological study of Martian soil, particularly structural formations on the surface and the proposal of a crust model from a modeling of materials resistance that justifies the above mentioned structures. It will end with a geomorphological map of the mars crust. The work in itself will discuss scientific questions being based on the observation of the topography of the planet with the exception of the conclusion in which chemist and physicist of the surface will be interlaced for such of contributing an engineering proposal.

Agradecimientos

En primer lugar agradecer al instituto geológico y minero de España por su contribución con los datos topográficos de Marte. En especial a nuestro Mentor Eulogio Pardo-Igúzquiza por su incesante ayuda, mostrándonos su fascinación por la geología.

También nos gustaría agradecer a nuestro profesor de Quimicafísica de materiales de la Universidad, Xavier Giménez Font, su paciencia y ayuda en la resolución de problemas así como a nuestra tutora universitaria Mercè Segarra quién nos facilitó programación de elementos finitos con el fin de modelar y cualificar ecuaciones, mostrando así también su apoyo e interés.

Considerar el esfuerzo realizado por Sven Wallin Haro, por su colaboración en la composición de imágenes del mapa geomorfológico.

Finalmente, el recuerdo más especial a nuestra familia, por darnos siempre su apoyo en todo lo que nos proponemos y la confianza que siempre depositan en nosotros. En concreto el apoyo mostrado por Alberto Canals Pou, primo de Miguel Palos Pou y trabajador de la Agencia Espacial Europea. Si no fuera por él no nos habríamos encauzado en este viaje.

Contenido

1. Introducción	1
1.1 Material y métodos	3
2. El planeta rojo	4
2.1 Introducción	4
2.2 State of the art	4
2.3 Investigación	8
2.3.1 Características Fisicoquímicas de la superficie	19
2.3.2 Mapa Geomorfológico	37
2.3.3 Aplicaciones	38
3. Conclusión	49
BIBLIOGRAFIA	50
ANEXO	52

1. Introducción

Cada uno de nosotros existe durante un tiempo muy breve, formando parte de una historia, y en este tiempo tan solo explora una parte diminuta del conjunto del universo. Pero los humanos somos una especie con una curiosidad innata. Nos preguntamos, buscamos respuestas; a veces las hayamos, a veces no. Viviendo en este vasto mundo y contemplando la inmensidad del firmamento encima de nosotros, nos hemos hecho siempre una multitud de preguntas, ¿Cómo se comporta el universo? ¿Cuál es la naturaleza de la realidad? ¿Qué es la vida?

Con los pies en la tierra y la mirada fija en el firmamento buscamos respuestas más allá de nuestra esfera. Lo que un día podría haber sido un sueño se está convirtiendo cada vez más en una necesidad.

En el último decenio hemos entrado en la tercera era de la exploración Marciana. La primera se produjo en el siglo XIX, con las observaciones telescopicas de los científicos curiosos. La curiosidad dio paso a la segunda Era de exploración, que abarcó los años sesenta y setenta del siglo XX, en los que llegaron a él naves espaciales. En la tercera y probablemente la última Era antes de los primeros asentamientos, los satélites en órbita y las expediciones en tierra han revelado la composición del planeta y detallado su topografía, determinado su mineralogía y fotografiado la superficie con precisión suficiente para interpretar procesos geológicos.

A lo largo de éstos últimos años hemos visto como Marte pasaba de ser un mero punto en el sistema solar a una tierra con volcanes prominentes, de lechos fluviales secos, de antiguos lagos y de llanuras de lava barridas por el viento. Marte cuenta con una de las historias más apasionantes del sistema solar. Llevamos años discutiendo en torno a cuestiones fundamentales: Si el planeta fue cálido y húmedo como la Tierra o bien frío, seco y árido como la Luna.

Un pasado semejante a la tierra ha despertado en el hombre el interés por determinar su habitabilidad, para ello se busca manifestaciones de vida pasada y elementos biológicos esenciales, como agua o hidrocarburos, a través de investigación espacial.

El trabajo que se va a presentar va más allá de un concurso. Buscamos obtener conocimiento científico; dar un paso más en nuestro aprendizaje Universitario y poder aportar un pequeño paso para el hombre.



El origen e interés de la idea surgió, en esencia, de un “brain storm” entre mi compañero Sergio y yo, Miguel, en la búsqueda de una idea en la que realmente disfrutáramos y pudiéramos obtener algo a cambio (conocimiento). En un principio teníamos como objetivo el diseño de un módulo de almacenamiento de energía magnética en la luna haciendo uso de una temperatura de superconducción de los cráteres lunares. No salió a la luz ya que antepusimos la investigación e innovación a un sistema ya existente. Varias ideas surgieron tras largas tardes en la Universidad. Otra de ellas, el estudio de la estabilidad de metales bajo tales condiciones marcianas tanto atmosféricas como temperamentales y una propuesta de los futuros materiales en una colonia marciana. Ésta no siguió adelante ya que preferimos tratar un tema que, aun tratando un área de nuestra ingeniería, diera fruto a un camino de conocimiento y descubrimiento. Finalmente, entrelazando ideas y gracias a las propuestas de nuestro mentor alcanzamos el culmen de los objetivos en mente en el trabajo que se presenta a continuación.

Los cuerpos celestes que rotan próximos al sol (como Mercurio) experimentan rangos de temperatura extremadamente altos y por lo tanto grandes tensiones diurnas. Los cuerpos más lejanos del sol, como los asteroides, presentan menor gradiente de temperaturas, pero rotan más rápidamente, por lo que presentan un mayor número de ciclos térmicos y por lo tanto mayor inercia térmica.

En nuestro planeta, durante el periodo invernal, la mayor inclinación del eje de rotación de la tierra le confiere una menor radiación solar y por lo tanto un clima más frio. La capa de ozono, entre otras cosas, dispersa parte de la radiación lumínica que recibe la tierra. La desaparición de ésta produciría en invierno temperaturas calurosas durante el día debido a la menor dispersión del haz solar mientras que, al caer la noche, las temperaturas se tornarían invernales. Éste efecto ya es un hecho y, más que resfriados, provoca cada vez estrés térmico en la superficie terrestre.

Entender los procesos geológicos y la historia climática de marte y averiguar si la ruptura por estrés térmico es primordial en determinados planetas dará paso al conocimiento del ritmo de producción de regolito, la evolución temporal de la superficie Marciana, los procesos que lo han llevado a cabo y las condiciones del relieve de posibles exoplanetas. También podrá aportar importante información para la exploración espacial, como predecir las propiedades de las diferentes áreas para futuros aterrizajes y asentamientos.

Interpretar la topografía del terreno y estudiar los rasgos geomorfológicos presentes abrirá la puerta al mejor entendimiento de la evolución del Cosmos y a cuestiones fundamentales sobre la vida.



1.1 Material y métodos

Las observaciones geofísicas se realizaran e ilustraran a partir de modelos tridimensionales e imágenes topográficas de la superficie. Estos son realizadas con el programa 3DEM y los datos MOLA por contribución del instituto minero y geológico de España.

En ciertos casos en que rija ciertas características visuales se hará uso de la base de datos THEMIS.



2. El planeta rojo

2.1 Introducción

Conocido por sus tonalidades rojizas es el cuarto planeta del sistema Solar más cercano al Sol. Su corteza, cubierta por un polvo pardo rojizo de óxidos de hierro, da lugar a veces a vastas regiones oscuras, zonas en las que el polvo o regolito es diseminado por tormentas y vientos. Un diámetro de 6.794 Km, aproximadamente la mitad del terrestre, le confiere una tercera parte de su gravedad y por lo tanto una atmósfera más delgada.

Fue Galileo Galilei en 1609 quién por primera vez observó Marte con telescopio. Dio paso a una nueva era de exploración. Mediante la observación telescopica se pudieron distinguir los casquetes polares presentes durante el invierno y prácticamente ausentes en el verano marciano, así como una atmósfera cuya transparencia depende de las condiciones meteorológicas que incluyen gigantescas tormentas de polvo.

Gracias a los telescopios se elaboraron los primeros mapas de Marte hasta la actualidad, en que los datos de las recientes exploraciones están abriendo paso a una nueva y precisa cartografía.

2.2 State of the art

En abril de 2001 Estados Unidos envía la sonda espacial *Odyssey* junto a una cámara de imágenes infrarrojas. El Sistema de imágenes de emisión térmica (THEMIS) en marte ha permitido identificar la composición de la superficie marciana así como su relieve.

En 2004 toman suelo, en sendos puntos de marte, *Spirit* y *Opportunity*, dos robots que determinarían la composición del suelo de las rocas y emprenderían el viaje para dar respuesta a la cuestión central de la geología Marciana: ¿Cuál ha sido allí el papel del agua?

Si Marte tuviera actividad interna considerable el calor de su interior derretiría el hielo pero las imágenes de la *Mars Express* (ESA) y de la nasa parecen confirmar que la actividad volcánica terminó hace millones de años, la posible actividad remanente probablemente no sea suficiente para realizar un último suspiro.

Gran parte de los procesos geológicos observados en la tierra ocurren o ocurrieron también en marte en un tiempo pasado, sin embargo, las formaciones son completamente diferentes. Marte muestra una clara asimetría superficial. El hemisferio Sur está formado por una superficie muy craterizada, por lo tanto muy antigua mientras que Las llanuras del hemisferio

norte, por el contrario, tienen pocos cráteres y se encuentran en promedio aproximadamente 6km más bajo que el hemisferio sur respecto al nivel medio del planeta.

No se conoce el origen de ésta asimetría. Una primera teoría, la del gran impacto, propone que el hemisferio es relativamente liso debido a que un impacto estelar de grandes dimensiones colisionó con la superficie. Una segunda teoría defiende una convección desigual entre ambos hemisferios, cuando el interior de marte era geológicamente activo: en el hemisferio sur los movimientos de magma eran mayormente descendentes mientras que en el norte, ascendentes; de modo que la lava cubriría la superficie alisándola¹. En la tierra, la lava de los volcanes contiene minerales como la magnetita, que contiene en su interior cristales con polaridad desordenada. Al enfriarse la lava, los cristales se orientan en la dirección del campo magnético en dicho momento, adquiriendo un magnetismo remanente, convirtiéndose así en una propiedad fija de la roca.

Los datos obtenidos de la temperatura muestran una mayor temperatura superficial en la zona norte que en la sur, lo cual concordaría con dicha hipótesis. Sin embargo, los datos obtenidos sobre el campo magnético de marte muestran una clara asimetría; la zona norte no presenta prácticamente campo magnético² mientras que el hemisferio sur presenta la mayor parte de él.

Serán necesarias posteriores observaciones para poder demostrar cual es la verdadera teoría. Se toman ambos datos, tanto del campo magnético como de las temperaturas para posteriores conclusiones.

Los volcanes situados en el hemisferio norte, en concreto los situados en la región de Tharsis son entre 10 y 100 veces más grandes que la media de las formaciones volcánicas terrestres y, por lo tanto, de coladas también más extensas. Ello se debe probablemente a los ritmos de erupción más continuos y a la menor atracción gravitatoria del planeta. Una de las razones por las que se pudieron formar estructuras de tales dimensiones es porque las regiones más calientes del manto se mantuvieron fijas respecto a la superficie durante centenares de millones de años, dada la débil tectónica presente.

Observando la geometría que forman las formaciones volcánicas y relacionándolas con cambios bruscos en la elevación del terreno da paso a la posibilidad de determinar zonas de subducción de placas y límites de falla.

Este hecho ha permitido a los geólogos señalar diversas estructuras como señales de estos procesos. Se han detectado zonas en el valle de Ares (**Imagen 1**) que podrían ser indicios

¹ Sleep, N.H. 1994

² Las imágenes térmicas y magnéticas serán incluidas en el anexo.

de subducción de placas, con una disposición de rocas similares a las que se da en la tierra en estas zonas.

La alineación de los montes Tharsis paralelos al gran cañón del Valle Marineris es semejante a las formaciones en las fallas terrestres, en las fallas de transformación¹

Otros rasgos de la geología marciana requieren una etapa de tectónica de placas; Como la diferencia de altitud en el relieve de capas contiguas, cuyo símil serían los taludes continentales de los océanos terrestres. En concreto zonas como Arabia terra pudieron haberse originado por un proceso de subducción, lo que originó un borde constructivo tras el arco volcánico de Tharsis.

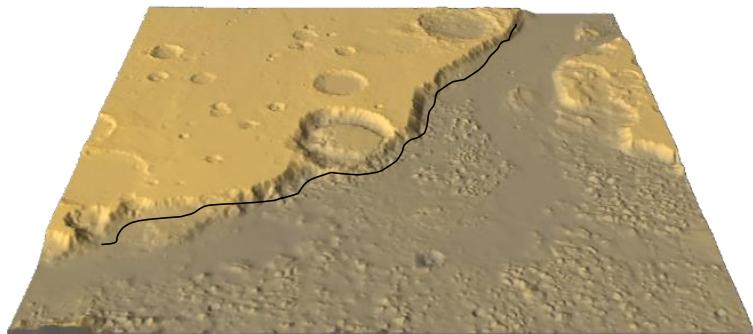


Imagen 1: MOLA. Zona de subducción de placas en el valle Ares. Lat. -5.5322, Long. 322.8213, El. - 1637m

Los cráteres más cercanos a las zonas polares se diferencian de los de las latitudes ecuatoriales; los cercanos a los polos están más degenerados, tienen bordes muy redondeados y se observan zonas residuales que parecen haber fluido². Éstas características sugieren que hubo agua líquida o helada en las regiones próximas a los polos, donde la temperatura es menor y el hielo es estable a poca profundidad³.

¹ Castro, Alicia y Fontañá, Claudino, *Tectónica de Placas en los planetas Telúricos*, Ciencias de la Tierra y el Espacio.

² Adrian Brown *et al.* 2008, *Louth Crater: Evolution of a layered water ice mound*.

³ En la descomposición de la atmósfera Marciana, que se citará posteriormente, la reducción temporal de la presión atmosférica provocó la evaporación del agua en la superficie. A excepción de las zonas polares, donde las menores temperaturas y menores cambios térmicos han permitido que se mantenga agua en forma sólida.



El *Spirit* se posó en 2004 sobre el cráter Gusev, elegido por su relieve: Las imágenes tomadas en órbita revelaban la formación de un valle, el Ma'adim, en el cráter, exactamente, como si Gusev hubiera sido un lago alguna vez.

En un comienzo *Spirit* no halló signos de la presencia anterior de agua. Sí mostró rocas volcánicas compuestas, según los espectrómetros, por olivino y piroxeno, minerales muy sensibles incluso a la más mínima gota de agua líquida.

La observación de que no han sido afectadas por el agua, indicó que estas rocas no han sido expuestas a cantidad alguna de agua en los tres mil millones de años transcurridos desde que las erupciones las arrojaron al exterior.

Posteriormente, cuando el *Spirit* alcanzó las colinas Columbia, descubrió allí grandes cantidades de sales de azufre. Evidentemente, las rocas volcánicas se rompieron en pequeños granos que la sal cementó después; este proceso pudo haberse dado debido a una infiltración de agua líquida dentro de las rocas o a la presencia de ácido sulfúrico que reaccionase con los minerales de la roca.

A pesar de esta sugerencia de agua líquida en un pasado, sus rocas siguen conteniendo cantidades elevadas de olivino y piroxeno.

Por lo tanto, a pesar del parecido del lugar con el lecho de un lago, el agua habría desempeñado un papel menor en los últimos miles de años.

Por otro lado, El robot *Opportunity* se encaminó dirección a las llanuras Meridiani. En los mapas mineralógicos que se elaboraron, Meridiani sobresalía por su notable concentración de hematites cristalinas.

Éste óxido de hierro, uno de los minerales que aporta el color rojizo del planeta, es común en la tierra y se forma a través de varios procesos, la mayoría de los cuales requieren agua. Así por precipitación de fluidos que circulan por los sedimentos; también por deposición y deshidratación de minerales de hierro que contengan agua, como la goethita $\alpha\text{-FeO(OH)}$, mineral rojizo que se halla en suelos desérticos.

Las condiciones físicas de un gran número de rocas confirmaron la anterior presencia de agua: Las hematites adoptaron la forma de esferas llamadas “arándanos”, de uno a cinco milímetros de diámetro, dispersas por el suelo. Un paisaje característico de erosión por agua.

A los pocos días del aterrizaje del robot *Opportunity*, se confirmó que Meridiani estuvo bajo el agua alguna vez.

2.3 Investigación

La historia geológica del planeta ha ido experimentando cambios radicales y misteriosos, de un lugar a otro y a lo largo del tiempo. Aun siendo un planeta que actualmente difiere al nuestro en bastantes procesos y comportamiento, desde la composición atmosférica hasta la estabilidad de muchos compuestos orgánicos, geología y composición química resultan familiares.

Análogamente a la tierra aun difiriendo en algunas causas que los han producido se presentan diversos procesos morfológicos en el relieve marciano, en particular:

- Volcanes de expansión con fallas en el terreno
- Redes de drenaje
- Deslizamientos
- Cráteres de impacto
- Cañones tectónicos
- Hoyos o *Pits*
- Fracturas en relación a volcanes
- Erosión

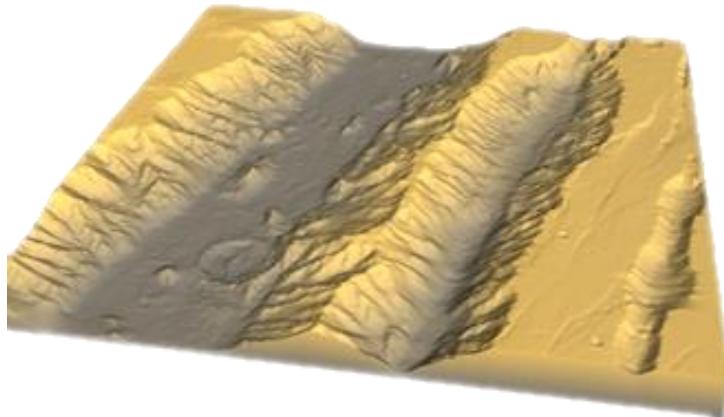


Imagen 2: MOLA. Valle Marineris. Lat.: 12.7265, Long.: 141.9529,
Elev.: -2885m

Grietas y fallas surcan la red de escarpados acantilados de Claritas Rupes, una serpenteante red de fosas tectónicas o *grabens* que se extiende más de 2000 Km. Ésta continua línea de grietas que forman parte del límite oriental de la región volcánica Tharsis indican que se formaron por la tensión en la corteza marciana producida por la formación de



éstos. La expulsión de grandes cantidades de material volcánico habría provocado el deslizamiento de grandes y continuos bloques rocosos resultando un paisaje característico terrestre, conocido como fosas y pilares tectónicos.

Características semejantes definen los pronunciados acantilados del valle Marineris (**Imagen 2**), las fracturas se vieron propiciadas por la actividad volcánica, empujando a Tharsis desde abajo. Toda la región se levantó y la corteza de las rocas de los alrededores se estiró y rompió en fallas y fracturas. Las direcciones sinusoidales del transcurso de los acantilados indican la pasada presencia de agua por la excreción a la superficie de fluidos subterráneos¹. El agua que fluyó socavó el terreno y amplió así la zona de fractura, entonces las paredes expuestas a la superficie se tornaron inestables provocando el desprendimiento de tierra que amplió el cañón aún más.

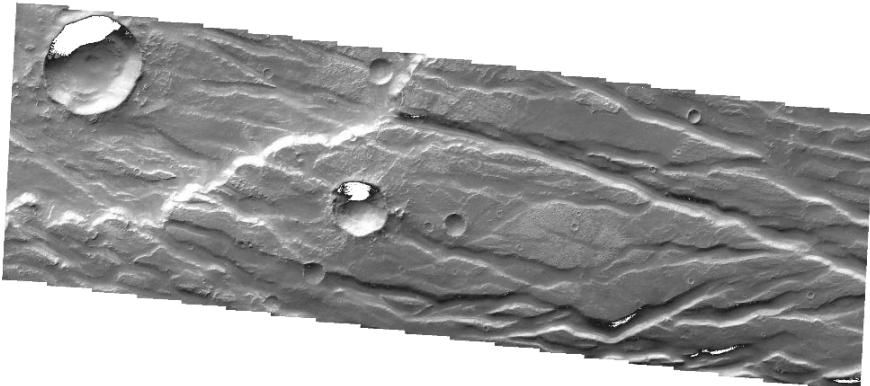


Imagen 3: THEMIS. Las fracturas y fallas que predominan en ésta imagen forman parte de la región de Claritas Rupes. Lat.: -21.318258°, Long.: 251.383°, Número de Órbita: 24492

Indicios parecidos de flujos de agua se pueden observar en Hebrus Valles. Su gran sinusoidalidad indica que el motivo de su formación fue una expulsión continua de agua subterránea en determinados puntos. De manera que éstas redes de drenaje formarían lo que se conoce aquí en la tierra como meandros. Éstos se producen por el reajuste de la pendiente del río, cuando la del valle por donde fluye es mayor que la que requiere². Además existen zonas donde parece haber subducción de aguas y excreción posterior, lo que indica la existencia de canales subterráneos. Estas vías de flujos de agua podrían estar estrechamente relacionadas con la actividad volcánica de los cercanos volcanes Tharsis. No fueron grandes desgarres del terreno las que produjeron este movimiento de aguas pero si probablemente la formación de hoyos y la contribución de la presión de los volcanes en la

¹ Imágenes de la sinusoidalidad incluidas en el anexo.

² JG Sánchez, José Antonio Maza Álvarez, "Morfología de Ríos", en Instituto de Ingeniería, Unam, *Manual de Ingeniería de Ríos* (Cap. 11), México.

excreción de fluidos y lodo volcánico. Proponemos que fueran producidos por una variante de los conocidos aquí en la tierra como Géiseres. El contacto entre el agua más superficial y las rocas calientes por el magma subterráneo eleva la temperatura del agua del interior de la corteza de marte y, por convección, regresa a la superficie a través de rocas porosas y fracturadas. Las redes de tuberías subterráneas conectan éstas fuentes de agua con el exterior. El agua fría de la superficie es presionada desde abajo por el agua más caliente de manera semejante a una “olla a presión”.

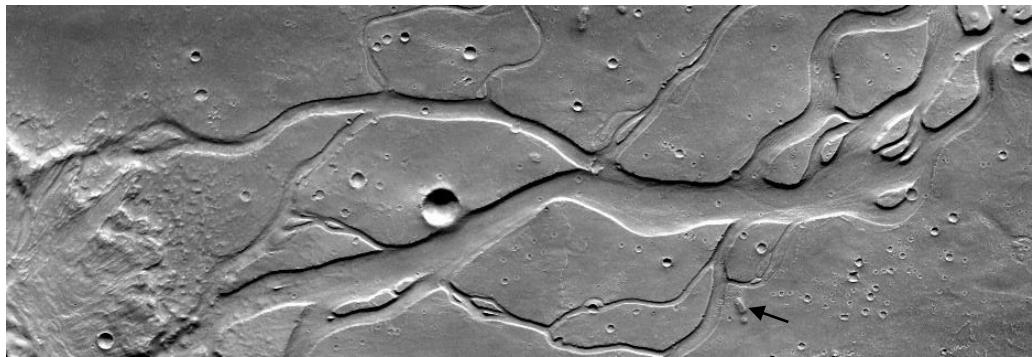


Imagen 4: Hebrus Valles. THEMIS. Lat.: 20.7796, Long.: 125.92

Es posible observar como el flujo del agua en ésta región de Hebrus Valles (**Imagen 4**) toma una dirección de sur a norte. Las marcas de erosión en forma de punta apuntan la dirección del curso del río mientras que la zona más redondeada o lisa es la producida por el choque del agua. Las flechas negras en la imagen indican crestas de volcanes de lodo.

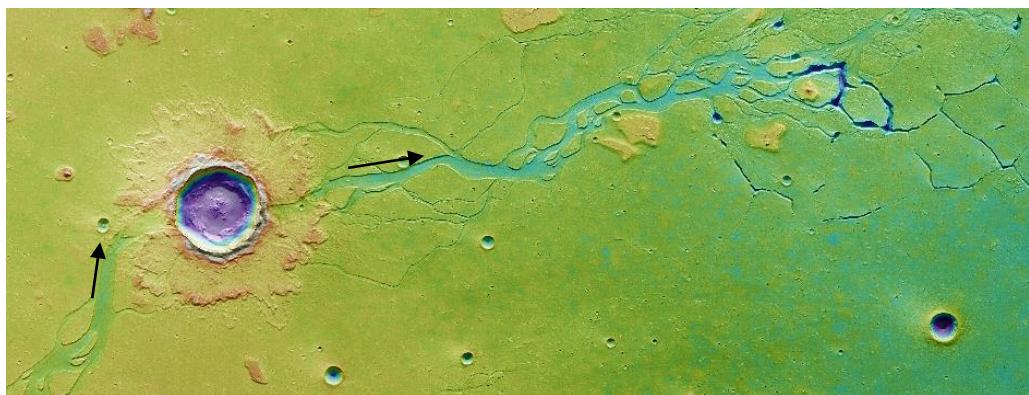


Imagen 5: “The flood after the impact” (199666). ESA. Hephaestus Fossae. En su publicación se afirmó que el gran impacto de meteorito produjo la excreción de aguas subterráneas. Sin embargo, a partir de las observaciones de la erosión del caudal concluimos que dicho flujo ya existía anteriormente al impacto y toma dirección de izquierda a derecha en la imagen.

Los canales subterráneos Marcianos fueron producidos por las mayores inundaciones observadas en nuestro sistema solar. Canales propiciados por el transcurso de agua

perteneciente de acuíferos¹, lagos así como capas de hielo continentales. En algunas zonas de las regiones estudiadas se interpretan volcanes de lodo que se agrupan en extensas crestas lineales (**Imagen 4**). Estos patrones se alinean también con hoyos independientes, cadenas continuas de éstos y depresiones.

Sugerimos que los canales en que se produjo un colapso interno lo expresaron en la superficie en forma de depresiones lineales. Semejantes características únicamente pudieron tener lugar en una corteza donde las grietas y la falta de cohesión entre grandes placas de rocas permitieran el flujo de agua en redes de gran continuidad y linealidad. La conectividad entre volcanes de lodo y las redes de hoyos sugieren un vínculo entre el volcanismo y el desarrollo de redes de cavernas.

La actividad volcánica responde a una distribución poco regular, los mayores volcanes del planeta se concentran en dos zonas situadas en el hemisferio norte: Los montes Tharsis y los montes Elysium. El monte Olympus es el volcán más alto conocido en nuestro sistema solar, con 22,5 km de altura y una superficie de 300000 km² se impone sobre el resto de formaciones geológicas marcianas. Es posible trazar una línea recta entre los tres volcanes Tharsis: Ascraeus Mons, Pavonis Mons y Arsia Mons. Juntos forman una estructura semejante a la sierra del Himalaya aquí en la Tierra. Éste hecho es indicativo de una subducción de placas continentales en la región de Tharsis lo cual concuerda con la formación del valle Marineris y las fracturas observadas en sus alrededores.

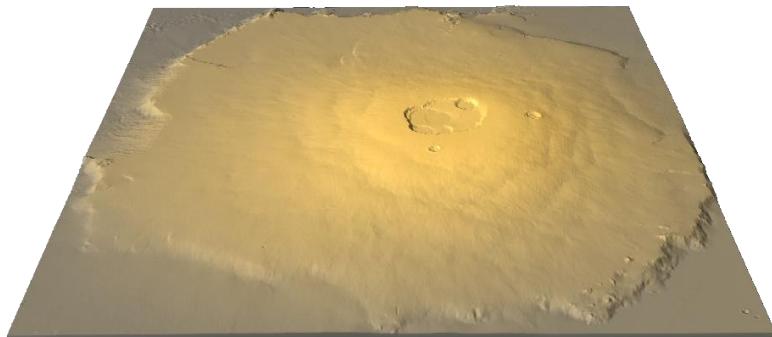


Imagen 6: MOLA. Monte Olympus. Volcán de tipo escudo

La mayoría de los volcanes de Marte son del tipo escudo o “shield volcanoes”, característicos por sus suaves pendientes, sus coladas continuas de lava muy fluida, la poca violencia de

¹ Clifford and Parker. 2001, *The Evolution of the Martian Hydrosphere: Implications for the Fate of a Primordial Ocean and the Current State of the Northern Plains*, Estados Unidos.

sus erupciones y una composición mayoritaria de basalto. En la Tierra, el monte Kīlauea (Islas Hawái) es conocido por su incesante actividad. En Marte, el principal representante de los volcanes de tipo escudo es el Monte Olympus.

El volcanismo que se presenta una mayor densidad en el hemisferio norte, es más, se encuentra altamente concentrado en la región de los montes Tharsis y Elysium. Los tres montes Tharsis definen los mayores volcanes de tipo escudo de la corteza, sin embargo, en sus alrededores se presentan decenas de ellos de menor tamaño como Biblis Tholus o Jovis Tholus.

Éstos datos indican regiones del hemisferio norte propensas a una mayor actividad volcánica y, por lo tanto, una mayor facilidad del magma a fluir al exterior. Entrelazándolo con las dos teorías que explicaban la menor altura de la región norte del planeta¹, una elevada actividad volcánica no hubiese sido suficiente para desnivellar la corteza semejante altura, debido a que el flujo de magma permitido por los volcanes sin que los canales de expulsión fragmentaran, no habría alcanzado ni una décima del hemisferio norte sin antes solidificar. Se propone que si se produjo tal convección desigual pero que fue la mayor cercanía del núcleo de Marte a la zona norte lo que hundió gran parte del hemisferio causando así una ruptura de placas en la corteza y formando las líneas de subducción observadas en las cercanías a los montes Tharsis.

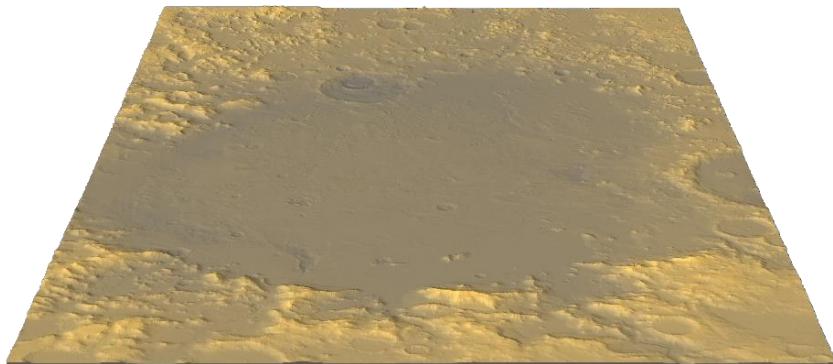


Imagen 7: MOLA. Cráter Argyre. Se observa la cuenca de impacto y una excreción radial de eyecta.

Diversas hipótesis se han presentado por tal de explicar el comportamiento de la superficie marciana y la meteorización de las rocas ante sus condiciones ambientales incluyendo el

¹ Ambas teorías explicadas en la pag.10

desgaste por sal¹, la oxidación y descomposición química² y el estrés térmico³. Sin embargo, ninguna ha presentado una observación detallada de los datos de las rocas o demostrado la importancia de dichos procesos.

Aunque otros procesos de fractura y ruptura de las rocas por estrés existan como la congelación interna o la precipitación de sales a lo largo de la historia de marte, que probablemente tengan un papel en dichos procesos, éstos provocarían fracturas en orientaciones aleatorias y un mecanismo menos agresivo que el que se presenta en el relieve de Marte.

En general, las fracturas en Marte tienen características semejantes a las fracturas de las rocas observadas en los desiertos terrestres. Existen diversos modelos que defienden la hipótesis de tensiones térmicas como responsables de gran parte de la meteorización física en la tierra⁴. En particular, una gran mayoría de rocas de un tipo en concreto encontradas en desiertos terrestres de latitud media presentan fracturas y grietas de orientación norte-norte-este. Se ha planteado el resultado que estas orientaciones resulten de la rotación terrestre.

Uno de los aspectos centrales de ésta investigación es la observación de las propiedades de los materiales con la temperatura. Las temperaturas guardan íntima relación con las propiedades de la materia, su composición y estructura interna y viceversa¹⁵ que a su vez son indicativas del origen, evolución e historia del planeta.

Las imágenes térmicas diurnas muestran los efectos de la emisión de la superficie, su reflectancia, propiedades térmicas e inclinaciones mientras que las imágenes térmicas nocturnas muestran principalmente los efectos de las propiedades térmicas intrínsecas en los materiales.

Se ha observado que la formación de deslizamientos y fracturas en la superficie de marte es considerablemente mayor que los producidos en la tierra. Fracturas no necesariamente bajo grandes tensiones mecánicas. Las **imágenes 8 y 9** muestran sin necesidad de grandes aumentos la presencia de grietas de considerable tamaño y zonas de ruptura completa en el cráter Gusev. Dichas fracturas únicamente pueden ser explicadas por una forma de

¹ Grant, J. et al. 2004, *Surficial deposits at Gusev crater along Spirit rover traverses*. Science

² James L. Gooding 1977, *Chemical Weathering on Mars Thermodynamic Stabilities of Primary Minerals (and Their Alteration Products) from Mafic Igneous Rocks*

³ Molaro, J. & Byrne, S. *Rates of temperature change of airless landscapes and implications for thermal stress weathering*. J. Geophys. Res.-Planet. 117, E10011 (2012).

⁴ Warren, K., Eppes, M.-C., Swami, S., Garbini, J. & Putkonen, J. *Automated field detection of rock fracturing, microclimate, and diurnal rock temperature and strain fields*. Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 3, 371–406 (2013).

McKay, C. P., Molaro, J. L. & Marinova, M. M., *High-frequency rock temperature data from hyper-arid desert environments in the Atacama and the Antarctic dry valleys and implications for rock weathering*. Geomorphology 110, 182–187 (2009).

⁵¹ El calor que propaga un material está relacionado con las propiedades intrínsecas de la materia, su composición y la estructura que lo define. Así, éstas, también son determinadas por el calor que es capaz de difundir dicho material.

tensión externa a la roca misma. La menor gravedad de Marte y la menor presión atmosférica respecto a la de la tierra inducen a la conclusión de que la carga de compresión que experimentan es menor. Cabría la posibilidad de ataque químico por parte de algún compuesto o micro bacteriano, en un pasado. Los planos continuos y unidireccionales de fractura de un gran número de rocas descartan ésta opción, ya que por el momento, no se ha descubierto compuesto o bacteria que haya desarrollado el gusto por determinados planos de roca.

Gran parte de rocas encontradas en Marte presentan características comunes que se repiten a larga escala, presentan propagaciones de grietas y fracturas semejantes a las observadas en los desiertos terrestres.

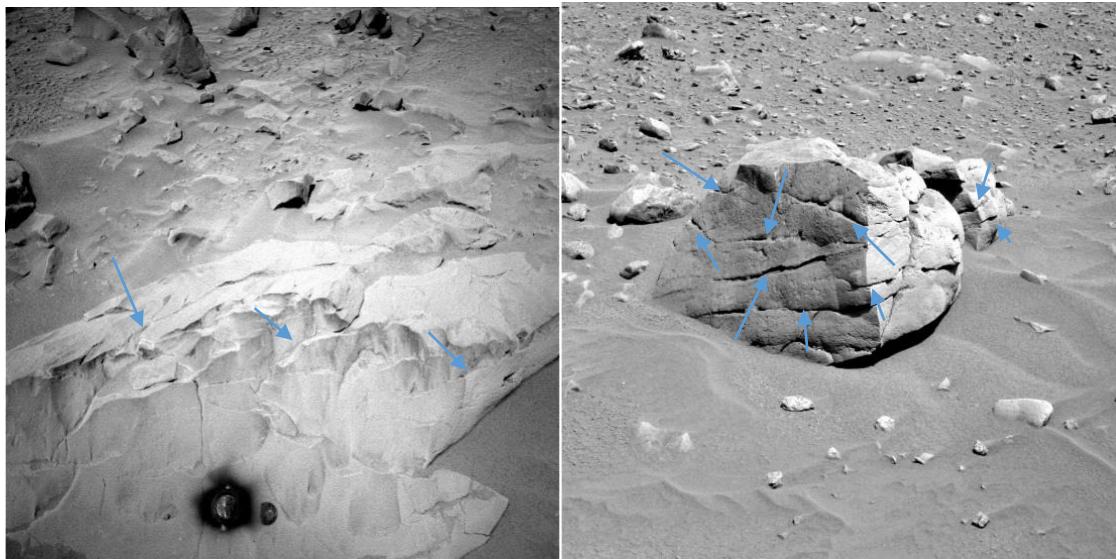
El planeta rojo presenta ciclos orbitales que son análogos a los ciclos Milankovitch que existen en la tierra. El clima está más influenciado por la forma de la órbita que lo que lo está el de la tierra. La mayor excentricidad y, por lo tanto, menor semejanza circular en la órbita a lo largo de un año en Marte implica que puede presentar grandes cambios en la temperatura a lo largo del año.

A pesar de que el año Marciano es aproximadamente 1,8 veces mayor que el terrestre, la duración del año sideral es únicamente 40 minutos más largo que la tierra. El plano de rotación alrededor del sol forma un ángulo con el eje de rotación del planeta sobre sí mismo de aproximadamente 25º, semejante al de la tierra.

Si existe una semejanza en las características que definen el movimiento orbital del planeta con el de la Tierra, las rocas de su superficie podrían presentar una orientación en las fracturas por estrés térmico también semejante a las observadas en los desiertos de latitud media en la tierra.

Hipotetizamos que las grietas en marte presentan orientaciones preferentes. No necesarias. La geometría en la dirección del calentamiento solar impulsaría el agrietamiento por fatiga térmica en determinadas direcciones. Nos basamos en que en los sólidos la propagación de la fatiga está estrechamente relacionada con la dirección del estrés aplicado.

En el amanecer marciano el sol saliente cercano al este expandiría las frías rocas de forma gradual hacia al oeste de manera que la presión que ejercería generaría tensión en el grano continuo, éste al siguiente y así sucesivamente. Produciendo así una tensión perpendicular al plano del grano y una propagación en la misma dirección que la aplicación de la fuerza. Dicha hipótesis es apoyada por la observación de gran número de rocas que presentan fracturas unidireccionales (**Imágenes 8 y 9**).


Imagen 8
Imagen 9

Ejemplo de fractura rocosa en marte. Imagen 8, realizada el sol 82 por Spirit en el Cráter Gusev a las 12:29:09, hora solar de Marte. Imagen 9, realizada a las 10:43:49 por Spirit en el cráter Gusev usando el filtro 7 (432nm).

La descomposición física es el principal mecanismo no tectónico de ruptura de las rocas en partículas de menor tamaño. En marte, como en la Tierra, la meteorización mecánica es el precursor de la producción de sedimentos y erosión y, puede influir en la descomposición química y variaciones posteriores en la atmósfera.

Identificar los agentes impulsores de la meteorización posibilitará el entendimiento de los impulsores del relieve Marciano.

Los procesos termo mecánicos como la fatiga térmica o los seísmos han sido propuestos como causas o contribuyentes de la ruptura rocosa en la tierra, especialmente en zonas áridas donde otros procesos de meteorización son despreciables y donde los cambios temperamentales bruscos prevalecen en las fracturas.

La formación y propagación de micro fracturas en las rocas ocurre debido a un ciclo de expansión y contracción de éstas, producidas por cambios en la temperatura causando gradientes térmicos los cuales dependen de la conductividad térmica y en definitiva la estructura interna de la materia.

Se suma otro factor en el estrés termo mecánico; las grietas y fracturas pueden formarse debido a la diferente entre coeficientes de expansión térmica de las diferentes capas. Esta forma de tensión toma un papel fundamental en la superficie Marciana debido a que la gran parte de ella está formada por una extensa capa de regolito, polvo granular sedimentado (<1mm) formado por diversos materiales, principalmente óxidos de hierro y silicatos.

Estas tensiones se concentran normalmente en los límites de grano y pueden llegar a extenderse inter y transgranularmente. Materiales con estrés térmico a menudo presentan fracturas en los límites de grano pudiendo mantener su continuidad a lo largo de varios

granos. A medida que las micro grietas se propagan a lo largo de tiempo pueden expulsar materia en las zonas cercanas a la superficie, incrementar la porosidad del material disminuyendo su tenacidad a la ruptura y/o unirse a otras grietas provocando la ruptura progresiva de la roca.

Nuestras predicciones parecen concordar con las observaciones. Comparando las imágenes infrarrojas nocturnas con las diurnas podemos obtener conclusiones acerca de la naturaleza de los materiales de la superficie. Es posible distinguir el tamaño de grano y la clase de material del que se trata observando cómo responde al calentamiento diurno y al frío nocturno. Durante el día el polvo de la superficie alcanza valores más altos de temperatura que la roca compacta de las laderas. Por la noche la escena se invierte. El polvo se enfriá rápidamente y las rocas internas mantienen más fácilmente el calor, éstas pueden mantener una temperatura de entre 20 y 50 grados centígrados mayor que la de la superficie¹ (**Imagen 10**).

Se observa una excreción radial centrada en los cráteres con una temperatura alterada respecto a la superficie más alejada (**Imagen 11**), probablemente debido a que se trate de material de granulometría más grande. Ésta observación, además, permite concluir que el impacto de dicho cráter tuvo que haber sucedido hace relativamente pocos años ya que el polvo superficial no ha tenido suficiente tiempo a cubrir el área de eyecta.



Imagen 10

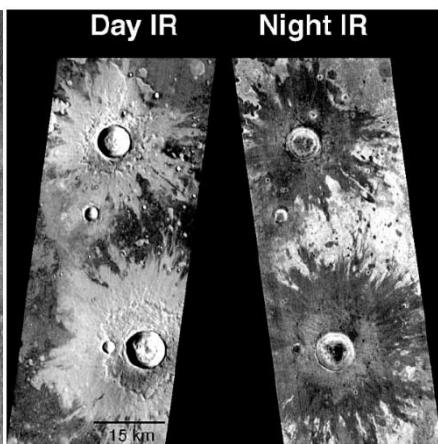


Imagen 11

Imagen 10: THEMIS. Muestra la diferencia térmica nocturna en Nili Patera caldera (9° norte, 67° este), con un rango de temperaturas de entre -82°C (zona oscura) a -56°C (zona clara). **Imagen 11:** THEMIS. Durante el día, las áreas claras significan mayor calor y granulometría más fina mientras que las oscuras indican zonas rocosas.

La resistencia máxima de la superficie rocosa o resistencia residual es el valor que cae la resistencia de algunas rocas para deformaciones elevadas.

¹ THEMIS data base



En condiciones naturales, la resistencia depende de las propiedades intrínsecas de la roca, cohesión y ángulo de fricción, y de otros factores externos como la magnitud de los esfuerzos que se ejercen, los ciclos de carga y descarga o las variaciones bruscas en la temperatura. La rotura ocurre cuando la tensión que soporta la roca es superior a la tensión de ruptura. Por este motivo, la resistencia no es un valor único intrínseco de la roca, y de aquí el interés en conocer su valor y sus rangos de variación para determinadas condiciones.

Los esfuerzos predominantes observados en la superficie son de corte, compresión, tracción y de fatiga térmica. Es posible observar a lo largo del gran cañón de Valle Marineris ([Imagen 2](#)) deslizamientos de enormes dimensiones. Éstas son provocadas por esfuerzos de corte, por la diferencia de pendientes, de compresión, por los macizos rocosos que soporta el terreno y de tracción-compresión, producido por la diferencia en la dilatación de los materiales en las distintas capas del terreno acompañado por la fatiga térmica. En un ambiente en el que la menor gravedad y menor actividad tectónica respecto a la terrestre propiciarían a una menor pronunciación de los rasgos geomorfológicos, la fatiga térmica en la ruptura y fracturación toma un papel fundamental.

En el transcurso del día Marciano se produce en la corteza un flujo de calor. Desde la medianoche hasta el amanecer se produce tensión en forma de tracción debido al calor que se mantiene en el interior de la corteza, mientras que la superficie externa mantiene una temperatura próxima a la ambiental. A medida que avanza el día la escena se invierte y las ondas electromagnéticas del sol son absorbidas en mayor cantidad por la capa externa del planeta por lo que surge una tensión de compresión. Éste comportamiento es posible definirlo a partir de las ecuaciones de balance térmico y mecánico;

$$Cp\rho \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot Q = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

$$M \frac{d^2u}{dt^2} + \nabla \cdot \sigma = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde Cp es la capacidad calorífica, ρ es la densidad, T es la temperatura, k es la conductividad térmica, Q es el flujo de calor, M es el tensor de masa y densidad, u el desplazamiento en las tres direcciones del espacio y σ el tensor de tensiones.

Las anteriores ecuaciones fueron utilizadas para cálculos del estrés térmico en la luna¹, sin embargo, se despreciaron términos en el balance térmico como la reducción del haz solar cuando los fotones atraviesan la atmósfera: extinción atmosférica; términos de emisión

¹ J.L. Molero 2013, *Grain-scale thermoelastic stresses and spatiotemporal temperature gradients on airless bodies, implications for rock breakdown*.



térmica o de dispersión. De la misma manera, serían necesarios datos sobre otras fuentes de calor como la desintegración radiactiva en el interior del planeta por tal de realizar un estudio cuantitativo. Dichos cálculos predijeron tensiones en el ecuador lunar de 100 a 200 MPa. Una superficie prácticamente lisa reduce la ruptura térmica en la Luna, sin embargo, en Marte, aun siendo del orden de las decenas de MPa por su menor gradiente térmico, la ruptura por estrés térmico reivindica su importancia al verse involucradas elevadas fuerzas externas por las elevadas diferencias en las elevaciones del terreno.

A partir de los términos presentes en el modelo, tanto los explícitos en las ecuaciones como los implícitos (Módulo de Young y Coeficiente de expansión térmica) se puede predecir que a mayor densidad y a mayor capacidad calorífica mayor es el flujo térmico en el material y, por lo tanto, mayor estrés térmico. Por otro lado, cuanto más elevado es el coeficiente de expansión térmica mayor es la tensión producida entre rocas contiguas.

Dichas conclusiones permiten deducir que materiales se ven mayormente alterados y cuales en menor proporción. Éstas se discutirán en el último apartado.

En la línea de estudio del estrés térmico de la corteza se presenta la fragilidad de los minerales que la componen como precursora de sus fracturas.

Algunos materiales presentan una transición ductil-fragil al disminuir la temperatura. Existe una temperatura por debajo de la cual la energía que el material es capaz de absorber al impacto antes de romper cae¹. A temperatura normal en la tierra (25°C) los materiales difieren entre ellos por su fragilidad. A medida que la temperatura disminuye, en mayor o menor medida, presentan una temperatura en que la fuerza interatómica entre planos cristalinos decaeⁱ. Éste fenómeno podría propiciar en gran medida la fracturación de la corteza Marciana. Las observaciones constatan algunas predicciones de que si existe ésta transición.

Alternativamente a medidas in situ, el aspecto de la superficie de fractura es indicativo de la naturaleza de la fractura. En la fractura dúctil ésta superficie aparece fibrosa debido a la capacidad del material de deformarse sin romper. Por el contrario, las superficies de fractura totalmente frágiles tienen una textura granular debido a la rotura sucesiva de enlaces atómicos a lo largo de planos cristalográficos.

¹ El barco "Liberty" se hundió en puerto por una incorrecta elección de las propiedades del acero del casco.



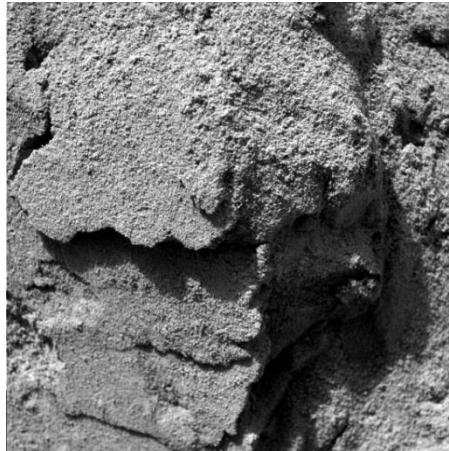
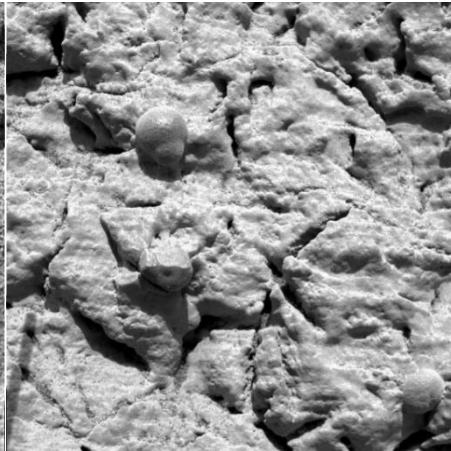

Imagen 12

Imagen 13

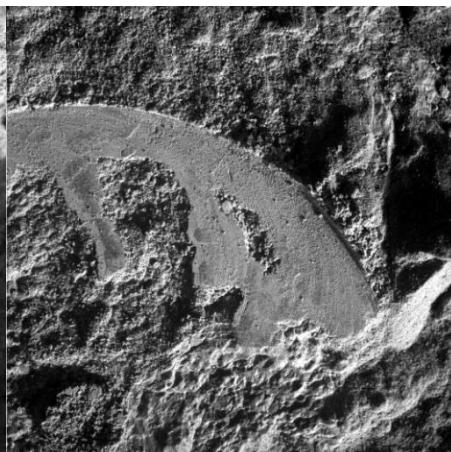
Imagen 14

Imagen 15

Imagen 12: Cámara Microscópica no-linealizada Full frame EDR. Realizada el sol 34 por Opportunity en Meridiani Planum a las 11:30:35 aproximadamente, hora solar de marte.

Imagen 13: Cámara Microscópica no-linealizada Full frame EDR obtenida el Sol 28 por Opportunity en Meridiani Planum

Imagen 14: Cámara Microscópica no-linealizada Full frame EDR obtenida el Sol 116 por Spirit en el Cráter Gusev a las 12:18:09 aproximadamente, hora solar de marte.

Imagen 15: Sol 4112. Imagen microscópica de Opportunity, Marathon Valley en el borde oeste del Cráter Endeavour explorando minerales de arcilla de filosilicatos.

Es posible observar una estructura áspera y facetada o en forma de gránulos como resultado de cambios en la orientación de los planos de clivaje de un grano a otro. También es visible una falta de cohesión entre fases en las cuatro imágenes. En la **imagen doce** predominan grietas las cuales son típicas aquí en la tierra en materiales arenosos. La **imagen quince** destaca por una zona lisa de forma semicircular que parece indicar una rotura por ciclos de fatiga, probablemente térmica. Características tan pronunciadas demuestran la falta de unión en el terreno y, por lo tanto, su fragilidad en gran cantidad de regiones de la superficie.

En conclusión, unos ciclos térmicos extremos incentivados por la fragilidad en gran parte de la corteza ha definido un relieve fragmentado y en tensión, un planeta donde la menor existencia de fuerzas como el abultamiento de un volcán o la formación de caudales han dado lugar a una geomorfología fracturada y una corteza bajo constante tensión.

2.3.1 Características Fisicoquímicas de la superficie

Por tal de buscar un emplazamiento donde desarrollar misiones tripuladas y futuras colonias es necesario comprender el comportamiento de la superficie marciana en profundidad. Se debe tener en cuenta tanto características físicas como químicas, que difieren totalmente de las terrestres. Una irregular magnetosfera, la incidencia de los vientos solares, una fina atmósfera compuesta principalmente por dióxido de carbono y la irregular distribución de los fenómenos geológicos, como fallas y volcanes, influyen notablemente en los fenómenos químicos y físicos que experimenta la superficie planetaria. En este apartado, se estudian las características atmosféricas y geoquímicas de Marte y lo interesantes que resultan a la hora de escoger una óptima localización para futuras misiones. Las localizaciones indicadas entre paréntesis hacen referencia a la **Tabla 3**.

2.3.1.1 La atmósfera

La composición de la atmósfera marciana resultó ser muy diferente a la terrestre. En primer lugar, es mucho más delgada y menos densa.

La presión atmosférica de Marte es de 7,5 milibares (0,224 milímetros de Mercurio) aproximadamente, 100 veces menor a la de la Tierra, y puede presentar variaciones de hasta un 50% dependiendo de las temperaturas. La densidad del aire media es de $0,0155 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

a) Composición química

El componente mayoritario es el dióxido de carbono con una proporción del 95% y una cantidad residual de oxígeno del 0,13%. Esta elevada concentración de anhídrido carbónico responde a la ausencia de un ciclo de reciclaje del carbono y de organismos fotosintéticos.

La humedad relativa del aire marciano presenta extremas variaciones entre el día y la noche, igual que las temperaturas, pudiendo llegar a una saturación del 100% durante la noche.

Componente	Marte	Tierra
CO ₂	95.3%	0.04%
N ₂	2.7%	78.1%
Ar	1.6%	0.9%
O ₂	0.13%	20.9%
H ₂ O	0 - 210 ppm	0 - 3%
NO	100 ppm	0.3 ppm
Ne	2.5 ppm	18.2 ppm
Kr	0.3 ppm	1.14 ppm
Xe	0.08 ppm	0.09 ppm

Tabla 1: NASA. Comparativa de la composición química (% en volumen) de las atmósferas marciana y terrestre. Datos obtenidos por las sondas *Viking*.

b) Temperatura

La temperatura en Marte puede alcanzar máximos de 20 °C en el verano ecuatoriano y mínimos de -153 °C en los inviernos polares. En las latitudes medias el rango de temperaturas se mantiene entre los 0°C y los -60°C. Estas profundas variaciones en las temperaturas provocan procesos de fatiga térmica en las rocas de la corteza marciana y resultarán un importante obstáculo en el uso de los materiales.

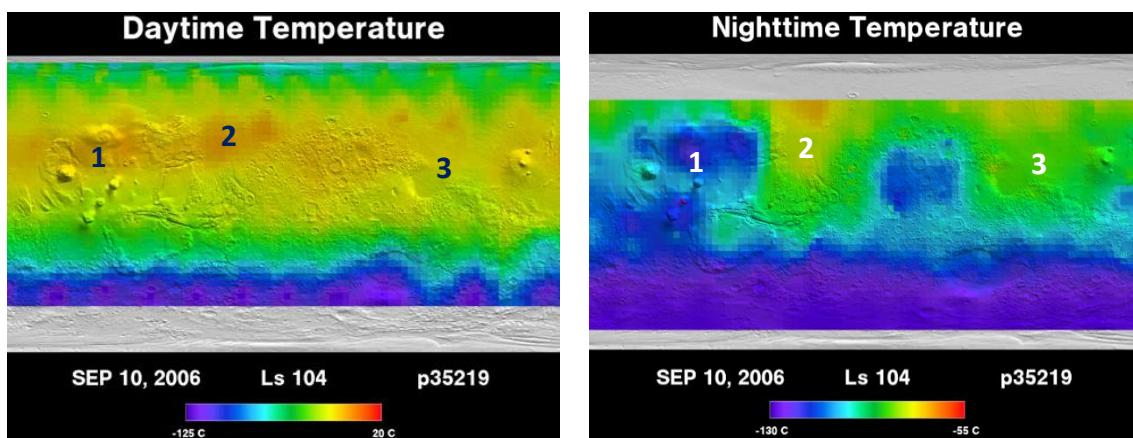


Imagen 16 y 17: Mars Global Surveyor, NASA. Temperaturas Diurnas y nocturnas en la superficie de Marte.

Las **imágenes 16 y 17** representan las temperaturas diurnas y nocturnas registradas el 10 de septiembre de 2006 por la sonda Mars Global Surveyor, y, corresponden a un día de verano en Marte. Durante el día, las temperaturas más altas se registran en áreas extensas

al norte de los Tharsis Montes (1) y en Acidalia Planitia (2). En cambio, durante la noche las temperaturas en los Tharsis Montes (1) caen por debajo de los -100°C mientras que se mantienen sobre los -65°C en Acidalia Planitia (2) y alrededor de los -80°C en Utopia Planitia (3).

Según estos datos, las zonas con temperaturas más elevadas y donde se produce la menor diferencia entre día y noche es en Acidalia Planitia (2). Si nos referimos a las temperaturas superficiales, esta es la zona más apta para el establecimiento de asentamientos.

c) Vientos y tormentas de polvo

Los vientos de Marte son suficientemente fuertes para crear tormentas de polvo que cubran parte del planeta. Pueden pasar meses hasta que todo ese polvo se deposite de nuevo en la superficie. Las sondas *Viking* registraron vientos de hasta 30 m/s (108 km/h) con una media de 10 m/s (36 km/h). Como en la Tierra, los vientos tienden a soplar en determinadas direcciones. Hay que tener en cuenta que pese a las importantes velocidades, la baja densidad de la atmósfera hace que, en comparación con la Tierra, las rachas de viento parezcan pequeñas brisas¹.

A menudo se producen rachas de viento suficientemente fuertes como para levantar las partículas superficiales más finas, principalmente compuestas por óxidos de hierro creando nubes de polvo que pueden llegar a tardar meses en depositarse de nuevo. Las partículas suspendidas se calientan con la luz solar aumentando ligeramente la temperatura de la atmósfera.

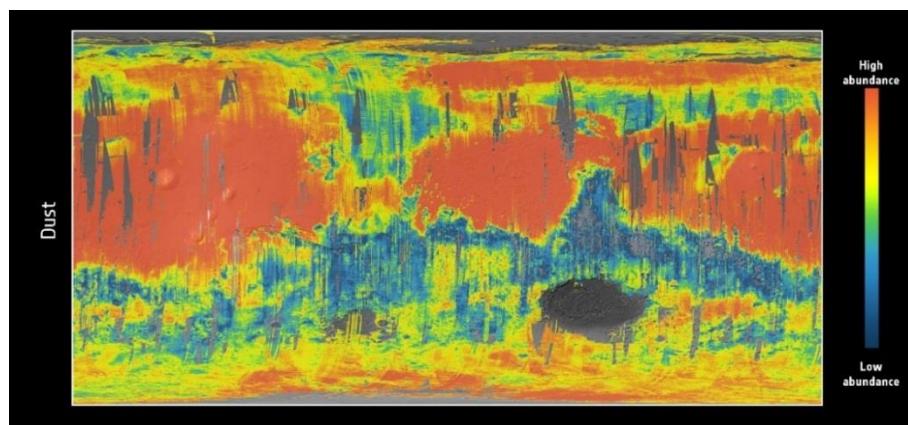


Imagen 18: ESA. *Dust abundance in Martian atmosphere.*

¹ Howell, Elizabeth 2015, Space.com, "The Martian Dust Storm Would Actually be a Breeze"

Se cree que las tormentas de polvo marcianas vienen acompañadas de descargas eléctricas en forma de rayos que caen sobre la superficie debido a las cargas eléctricas que se generan entre los granos de polvo. Los *rovers* aún no han encontrado rayos petrificados o *fulguritas* debidas a las tormentas eléctricas.

Estas tormentas de polvo causarían problemas tanto por erosión de estructuras, daño en equipos e interferencias en las comunicaciones; por lo que es conveniente evitarlas.

Las regiones con menor abundancia de polvo son Acidalia Planitia (2) y la mayor parte del hemisferio sur.

d) Campo magnético

Nuestro conocimiento sobre el campo magnético de Marte ha mejorado extraordinariamente desde las primeras observaciones llevadas a cabo por la aproximación del Mariner 4 en 1965. Aquellos datos iniciales, tomados a 13200 km de la superficie de Marte, indicaban la existencia de un campo magnético global muy débil, claramente distinto del campo dipolar de la Tierra, y una perturbación de tipo onda de choque en el viento solar próximo a Marte. Desde entonces la investigación ha estado orientada principalmente a profundizar en estos dos hallazgos y conseguir una descripción completa del campo magnético creado por Marte y de la forma en que interacciona con el viento solar.

A diferencia de la Tierra, que tiene un campo magnético dipolar generado por el efecto dinamo de su núcleo, algunas zonas de la corteza de Marte generan fuertes campos magnéticos que llegan a multiplicar por 10 al de la tierra. Se cree que el origen de estos campos magnéticos responde a una elevada magnetización de los minerales de hierro de la corteza. Esos minerales se habrían formado durante una etapa de intensos campos magnéticos generados por efecto dinamo del núcleo que se cree que terminó hace 4300 millones de años, quedando sus cristales orientados y manteniendo así campos magnéticos aislados en la superficie marciana.

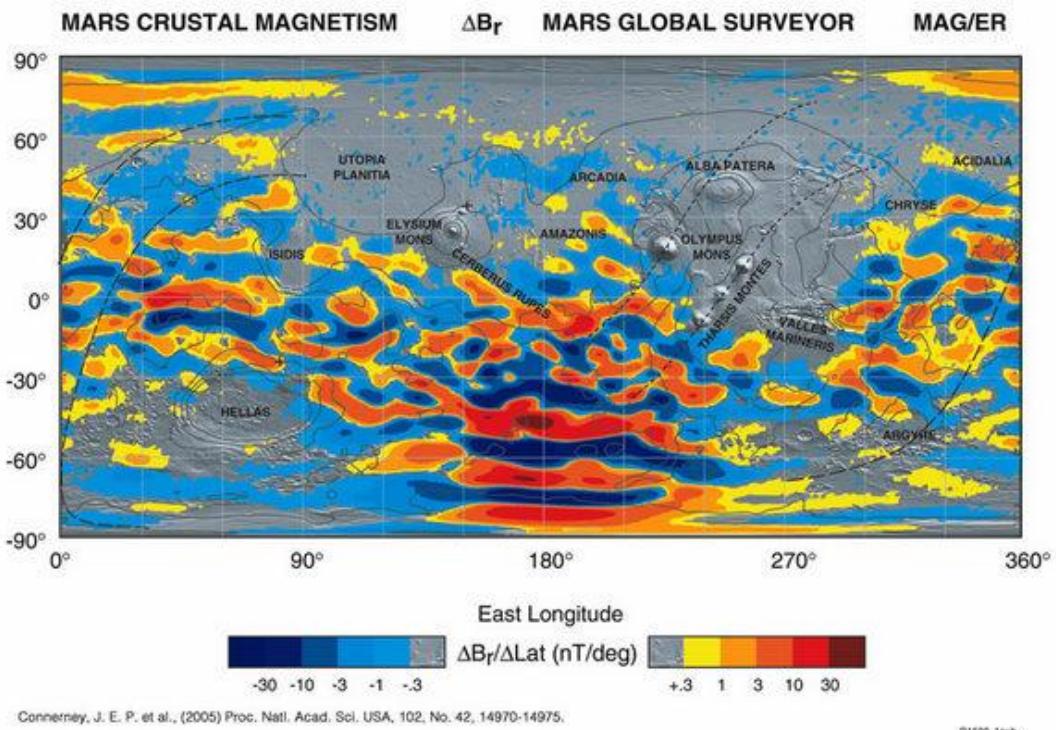


Imagen 19: Mars Global Surveyor, NASA. Magnetismo de la corteza de Marte.

Como Marte carece de campo magnético global su atmósfera superior recibe directamente el aporte del viento solar. Sin embargo, las intensas anomalías magnéticas de la corteza parecen formar “mini magnetosferas” que protegen las áreas situadas sobre ellas del viento solar, haciendo más complicada la interacción entre el viento y la superficie. Estas magnetosferas forman la ionosfera, que tiene una distribución muy irregular, concentrada sobretodo en el hemisferio sur y el ecuador.

Merece la pena comentar la ausencia de campos magnéticos en las llanuras del hemisferio norte, cráteres de meteoritos (Hellas y Argyre), Valles Marineris y zonas volcánicas como Olympus Mons, Tharsis Mons (1) y Elysium Mons (4). Estos fenómenos geológicos pueden haber provocado una alteración de los minerales de la corteza tiempo después de formarse esos campos magnéticos. Una posible explicación es la de la recristalización en ausencia de campo magnético dinamo de los minerales fundidos a causa de erupciones volcánicas e impactos de meteoritos.

e) El viento solar

El viento solar es una corriente de partículas cargadas expulsadas de la atmósfera superior del Sol (o de una estrella en general). Este viento consiste principalmente en electrones y protones con energías por lo general entre 10 y 100 keV. El flujo de partículas varía en su

temperatura y su velocidad con el tiempo. Estas partículas pueden escapar de la gravedad del Sol debido a su alta energía cinética y la alta temperatura de la corona.

El viento solar crea la heliosfera, una burbuja enorme en el medio interestelar que rodea el Sistema Solar. Otros fenómenos relacionados con la heliosfera son las tormentas geomagnéticas que pueden destruir redes de energía, las auroras boreales y el plasma de las colas de los cometas que siempre apunta lejos del sol.

La existencia de un flujo continuo de partículas que fluyen hacia el exterior del Sol fue sugerida por el astrónomo aficionado británico Richard C. Carrington. En 1859 Carrington y Richard Hodgson observaron de forma independiente por primera vez lo que más tarde se conocería como llamarada solar. Una llamarada solar es un estallido repentino de energía de la atmósfera solar. Al día siguiente se observó una tormenta geomagnética y Carrington sospechó que existía una conexión entre ambas (la llamarada solar y la tormenta electromagnética). George FitzGerald sugirió más tarde que la materia que se expulsa de forma acelerada desde el sol llega a la Tierra varios días más tarde.

En 1990 se lanzó la sonda Ulysses para estudiar el viento solar desde altas latitudes solares. Todas las observaciones anteriores se habían realizado en o cerca del plano de la eclíptica del Sistema Solar.

Efectos sobre la atmósfera

Existen teorías que dan como causa de la erosión de la atmósfera de Marte al viento solar. Se cree que al ir disminuyendo su campo magnético, los vientos solares fueron destruyendo su atmósfera, arrastrando la mayor parte de sus gases (incluido el vapor de agua) al vacío cósmico. Esta degradación de la atmósfera hizo disminuir la presión atmosférica impidiendo la existencia de agua en estado líquido (ya que se evapora instantáneamente) y, como consecuencia de esto, el planeta se volvió un inmenso desierto.

Efectos sobre la superficie

Las partículas ionizadas del viento solar: protones (H^+), núcleos de helio (α) y electrones (β); impactan sobre las rocas planetarias liberando una gran cantidad de energía provocando reacciones nucleares donde se emiten principalmente neutrones y radiaciones de alta energía (gamma).

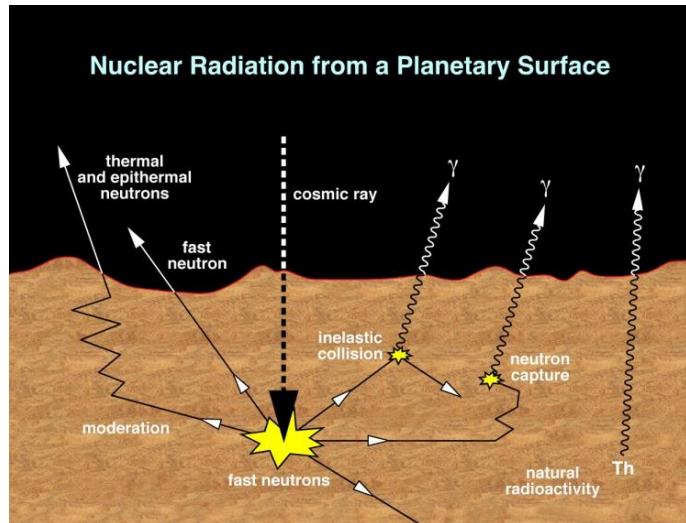


Imagen 20: NASA. Esquema de los efectos del viento solar en la superficie planetaria.

Ésta radiación gamma procede de la desintegración de ciertos elementos radioactivos y de reacciones de fisión y fusión nuclear, capaces de romper enlaces químicos e ionizar los átomos sobre los que incide.

Las radiaciones de alta energía fruto de reacciones nucleares como los rayos X y gamma resultan letales para los seres vivos ya que tienen sobrada energía como para desestabilizar los enlaces de moléculas orgánicas esenciales para la vida como el ADN y las proteínas.

La ionosfera de Marte

La ionosfera es el principal escudo contra el viento solar, por lo tanto, se tiene que tener en cuenta a la hora de buscar una zona de asentamiento por tal de proteger tanto a los habitantes como a los equipos electrónicos.

Respecto a la incidencia del viento solar, las zonas más habitables son Terra Sirenum (4), Terra Cimmera (5), Arabia Terra (6), el sur de Amazonis Planitia (7) y Chryse Planitia (8).

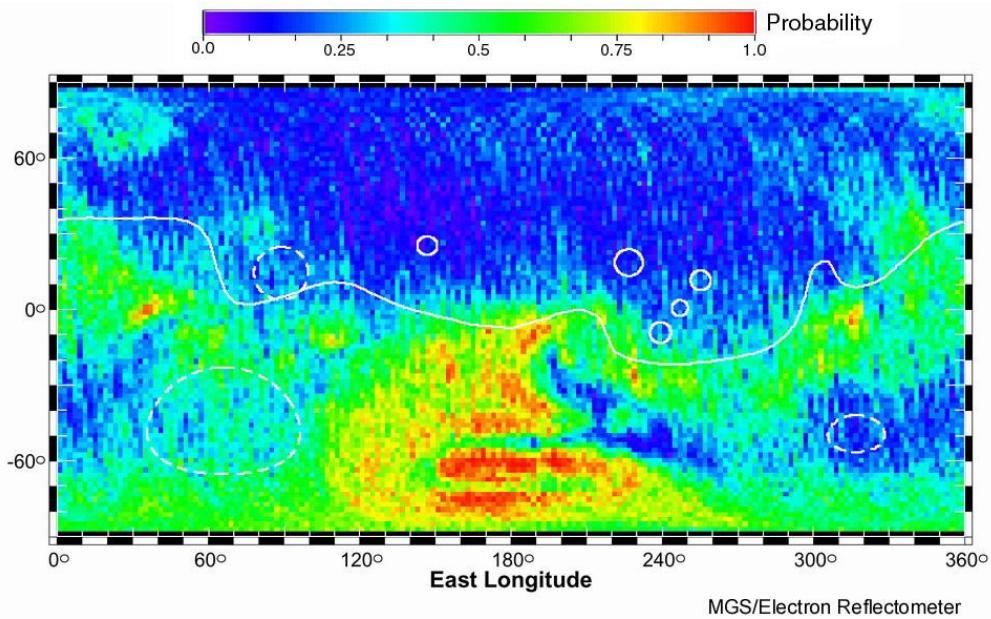


Imagen 21: Mapa de la ionosfera de Marte. Los colores representan las probabilidades que el *Mars Global Surveyor* (NASA) pase por la ionosfera al orbitar a 400 kilómetros de altura. Azul indica bajas probabilidades, lo que significa que la nave vuela por el viento solar y que la ionosfera está bajo la nave. Amarillo y rojo indican los lugares donde la ionosfera sobresale por sobre los 400 kilómetros de altura. David Mitchell, UC Berkeley.

f) Radiación cósmica

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de desarrollar misiones tripuladas en el espacio es el de las dosis de radiación cósmica emitida principalmente por el Sol, generada en los procesos de fusión nuclear que dan en él. Estas radiaciones cubren un extenso espectro electromagnético, desde el infrarrojo a los rayos ultravioleta, X y gamma.

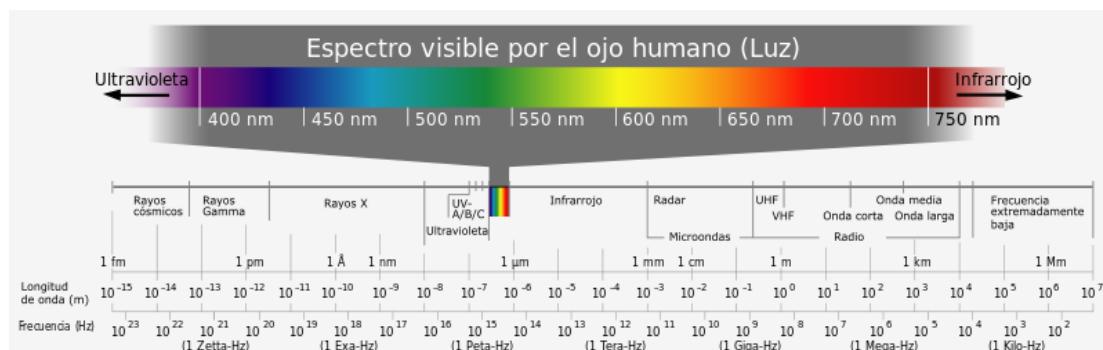


Imagen 22: Espectro electromagnético

La radiación infrarroja (longitud de onda: 750nm-1mm) es la que permite, en parte, un cierto calentamiento de la superficie del planeta. La radiación de espectro visible (longitud de onda: 400nm-750nm) es la que podemos captar mediante la vista y nos permite diferenciar los diferentes colores. Esta parte del espectro electromagnético no es suficientemente energético como para causar daños importantes en equipos electrónicos y seres vivos pero aporta calor y visibilidad, por lo tanto, es más beneficioso que dañino.

Por el contrario, las radiaciones de alta energía (también conocidas como radiaciones ionizantes) sí que son capaces de alterar las moléculas orgánicas y dañar circuitos. Esta parte del espectro electromagnético se divide en tres tipos de rayos en función de su energía:

- Rayos ultravioleta (UVA, UVB, UVC): Tienen una longitud de onda comprendida entre 15nm y 400nm. La radiación UV es altamente mutagénica, es decir, que induce a mutaciones. En el ADN provoca daño al formar dímeros de pirimidinas (generalmente dímeros de timina) que acortan la distancia normal del enlace, generando una deformación de la cadena. Los rayos UV son los causantes de las quemaduras por exposición prolongada al sol.
- Rayos X: tienen una longitud de onda comprendida entre 10nm y 0,01nm. La exposición a cantidades altas de rayos X puede producir efectos tales como quemaduras en la piel, caída del cabello, defectos de nacimiento, cáncer, retraso mental y la muerte. La dosis determina si un efecto se manifiesta y con qué severidad. La manifestación de efectos como quemaduras de la piel, caída del cabello, esterilidad, náuseas y cataratas, requiere que se exponga a una dosis mínima (la dosis umbral). Si se aumenta la dosis por encima de la dosis umbral el efecto es más grave. En grupos de personas expuestas a dosis bajas de radiación se ha observado un aumento de la presión psicológica. También se ha documentado alteración de las facultades mentales (síndrome del sistema nervioso central) en personas expuestas a miles de rads de radiación ionizante.
- Rayos gamma (cósmicos): tienen una longitud de onda inferior a 0,01nm y es la radiación más energética y con mayor poder de ionización. Es producida generalmente por elementos radiactivos o por procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón. También se genera en fenómenos astrofísicos de gran violencia. Los rayos gamma tienen un alto efecto cancerígeno y en suficientes dosis son letales. Además, pueden llegar a descomponer ciertos compuestos químicos orgánicos e inorgánicos.

Cálculo de las dosis de radiación absorbida

La dosis absorbida es una magnitud utilizada en Radiología y Protección radiológica, para medir la cantidad de radiación ionizante recibida por un material y más específicamente por un tejido o un ser vivo. La dosis absorbida mide la energía depositada en un medio por unidad de masa. La unidad en el Sistema Internacional es el J/kg, que recibe el nombre especial de gray (Gy).

El riesgo de efectos estocásticos debidos a la exposición a una radiación pueden ser medidos con la dosis efectiva, que es un promedio ponderado de la dosis equivalente de cada tejido expuesto, tomando en cuenta la radio sensibilidad de las poblaciones celulares que los forman. La unidad de estas dos últimas magnitudes es el sievert (Sv).

Existen también otra pareja de magnitudes utilizadas frecuentemente: rad y rem.

- rad era la unidad de dosis absorbida. Su equivalencia es 1 rad=0,01 Gy.
- rem era la unidad de dosis equivalente y de dosis efectiva, equivalente a 1 rad para rayos gamma. 1 rem=0,01 Sv.

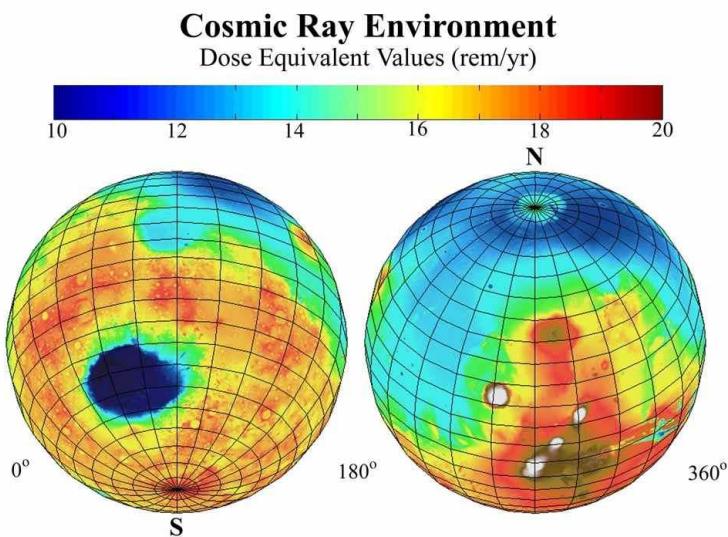


Imagen 23: Mapa de la radiación absorbida equivalente (gamma) en un año. NASA/Jet Propulsion Laboratory/JSC

Se puede apreciar claramente que las regiones con menor dosis de radiación son aquellas que se encuentran a menor altitud. Los cráteres Hellas y Agyre y las llanuras del hemisferio norte son aquellas con un menor riesgo para los seres vivos, por lo tanto son más adecuados a la hora de elegir una ubicación.

2.3.1.2 La litosfera

La litosfera de Marte presenta multitud de enigmas para los científicos debido a su similitud a la de la Tierra en composición química, fenómenos geológicos y formaciones minerales; pero a la vez constituye un mundo totalmente nuevo y desconocido caracterizado por la incoherente distribución de los fenómenos geológicos, inmensos edificios volcánicos y miles de cráteres causados por meteoritos. El conocimiento de la litosfera marciana permitirá el desarrollo de prospecciones y extracciones de recursos minerales e hídricos en una hipotética colonia en el planeta rojo

a) Composición del suelo marciano

La composición química de la corteza de Marte se asemeja considerablemente a la de la Tierra, como al resto de planetas rojos del sistema solar. Principalmente está formada por sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido de magnesio (MgO) y óxido de calcio (CaO). Estos compuestos forman la mayor parte de las rocas presentes en la superficie marciana. Los siguientes esquemas indican los datos recogidos por los *Rovers* y la sonda *Mars Odyssey*.

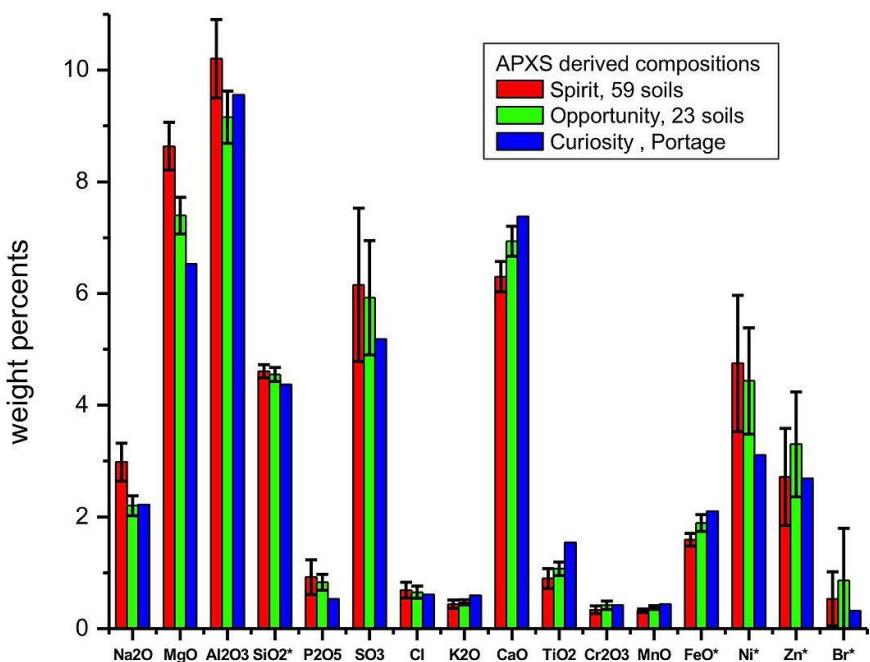


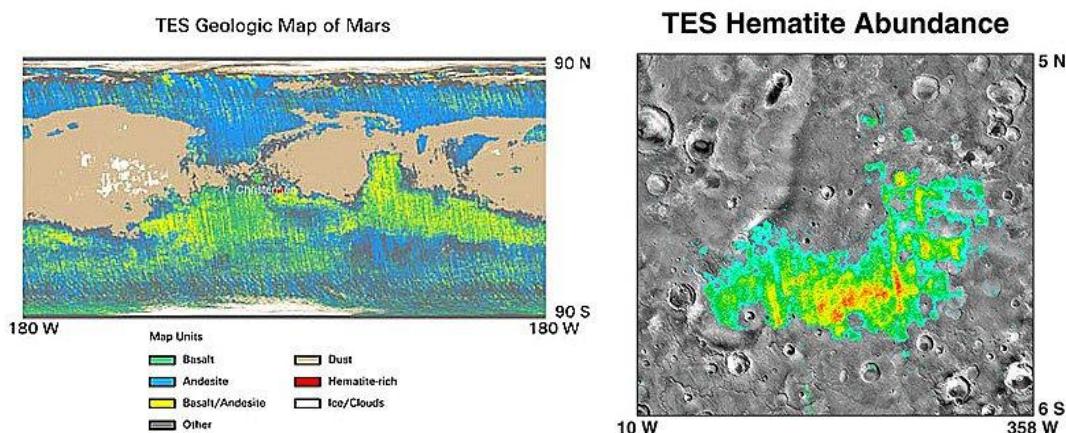
Imagen 24: Comparación de las muestras de la composición del suelo Marciano recogidas por: *Curiosity rover*, *Opportunity rover*, *Spirit rover* (NASA, Diciembre de 2012)

b) Distribución de los depósitos minerales

Varios estudios científicos de la corteza marciana se han centrado en la búsqueda de depósitos minerales aprovechables por una futura colonia en el planeta rojo. Estas investigaciones se han centrado en comparar el comportamiento de la corteza de Marte con el de la Tierra. Las principales zonas donde pueden abundar minerales de interés industrial y económico son los cráteres de impacto, zonas sedimentarias fluviales (Valles Marineris), regiones volcánicas con fenómenos hidrotermales y los depósitos de hematites de la llanura Meridiani.

Depósitos ricos en hematites

Ánálisis espectro gráficos de la corteza marciana han desvelado regiones ricas en hematites (Fe_2O_3) en la llanura de Meridiani (sur de Arabia Terra) que pueden resultar una importante fuente de hierro y metales comúnmente asociados como el titanio, el aluminio y el manganeso.



Imágenes 25 y 26: NASA. Distribución del tipo de roca no polar. Análisis tomado por el MGD TES.

Se muestra una zona rica en Hematites (Fe_2O_3) en color rojo.

Este depósito de hematites de la región de Meridiani resulta muy interesante a la hora de obtener minerales ferrosos con una concentración suficiente para que la explotación sea viable.

Depósitos volcánicos

La naturaleza de estos volcanes, que expulsan material líquido y gas puede llegar a producir importantes yacimientos minerales (sobretodo metales pesados) en la superficie gracias a la facilidad de asociación de los diferentes compuestos. Pueden resultar una interesante fuente de recursos minerales tales como aluminio, zinc, plomo, cobre, oro y diamantes. Por lo tanto, son interesantes zonas donde llevar a cabo prospecciones mineras.

Depósitos hidrotermales

Los depósitos hidrotermales son aquellos formados a partir de soluciones procedentes de la consolidación de un magma y también por la circulación de soluciones acuosas en la corteza terrestre, las cuales pueden estar constituidas por aguas magmáticas primarias o por mezcla de éstas con aguas meteóricas.

Los depósitos hidrotermales, conocidos comúnmente como Filonianos, se clasifican según su temperatura de formación, la cual varía entre 50° C y 500° C y en función a la mayor o menor proximidad a la roca donde se encuentre.

Desde la profundidad magmática hasta la superficie el agua pierde temperatura y presión, perdiendo en consecuencia la mayor parte de su poder disolvente. Por ello, casi todas las sustancias disueltas en el agua precipitan “en el camino” originando concentraciones o depósitos minerales.

Los conductos por los cuales el agua se moviliza son, fundamentalmente, fallas y diaclasas, aunque localmente pueden tener importancia otros espacios abiertos como vesículas de lava, intersticios de sedimentos, cuevas de disolución y brechas de colapso y de explosión.

Están constituidas fundamentalmente por Cuarzo (SiO_2) y diversos carbonatos como la Calcita (CaCO_3), Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y Siderita(FeCO_3), minerales que suelen constituir la ganga.

Las menas que pueden estar presentes en este tipo de yacimientos son principalmente: Barita (BaSO_4), Fluorita (CaF_2) y minerales sulfurados como la Piritita (FeS_2), Calcopirita(CuFeS_2), Blenda(ZnS), Galena(PbS), Argentita (Ag_2S), Cinabrio (HgS), entre otros minerales.

Estos tipos de depósitos minerales ocurren principalmente en zonas con actividad volcánica y a la vez bañados por agua. Por lo que podrían encontrarse alrededor de aquellos volcanes

que hayan estado cerca de un lago u océano pasado ya que podrían haberse generado flujos de lava a través de fisuras submarinas.

Si comparamos los mapas de la distribución hipotética del agua en un pasado y la distribución de los volcanes¹, se puede inferir cuales son las zonas donde pueden haberse producido fenómenos hidrotermales: en Valles Marineris, en los principales cráteres de impacto y alrededor de los montes Olympus, Tharsis y Elysium.

Cráteres de impacto

El hemisferio sur se caracteriza por su gran concentración de cráteres de impacto de meteoritos. Se cree que estos cráteres también pueden ser una importante fuente de recursos minerales debido a diferentes factores.

- La fusión de la corteza, causado por el calor del impacto, que pudo permitir la asociación y recristalización de determinados minerales presentes tanto en la corteza como en el propio meteorito.
- La exposición de los depósitos subterráneos que ha producido el cráter.
- Fenómenos volcánicos e hidrotermales derivados de la fractura de la corteza por el impacto.

Según el origen del yacimiento, se distinguen tres clases de depósitos:

- Progenéticos: los depósitos minerales que ya existían antes del impacto se ven modificados ya sea por la fusión y solidificación de la corteza o bien por el desplazamiento de material alrededor de las cuencas de impacto.
- Singenéticos: los depósitos son directamente producidos por la colisión del meteorito. Este puede haber aportado nuevos materiales o bien haber facilitado la asociación de compuestos minerales al fundir la roca de la corteza.
- Epigenéticos: los depósitos minerales son producidos a causa de un flujo hidrotermal derivado de la fractura de la corteza con el impacto y son bastante comunes en Marte. Este flujo hidrotermal origina importantes concentraciones de sulfatos y sulfuros de varios metales como por ejemplo la plata, el cobre, el plomo y el hierro.

¹ Incluidas ambas imágenes en el Anexo.

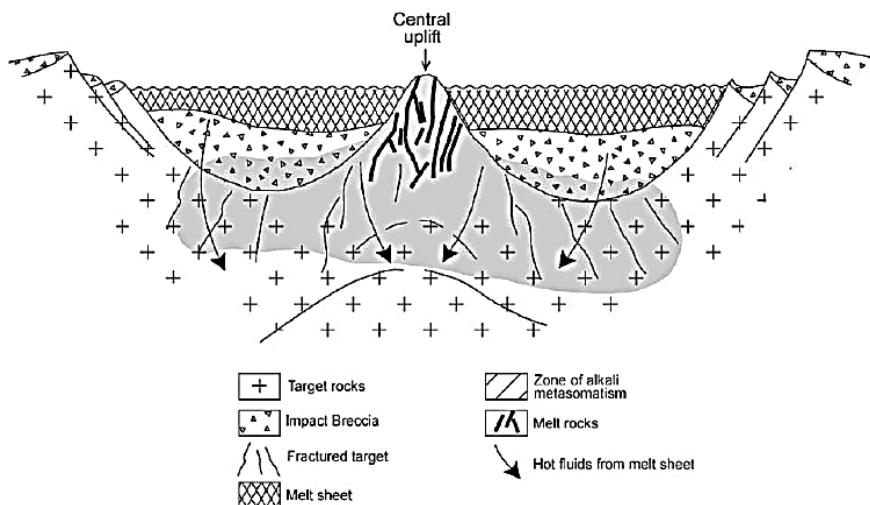


Imagen 27: Pirajno 2005, Geological Society of Australia. Fase 1. Modelo de la circulación de fluido hidrotermal en un cráter.

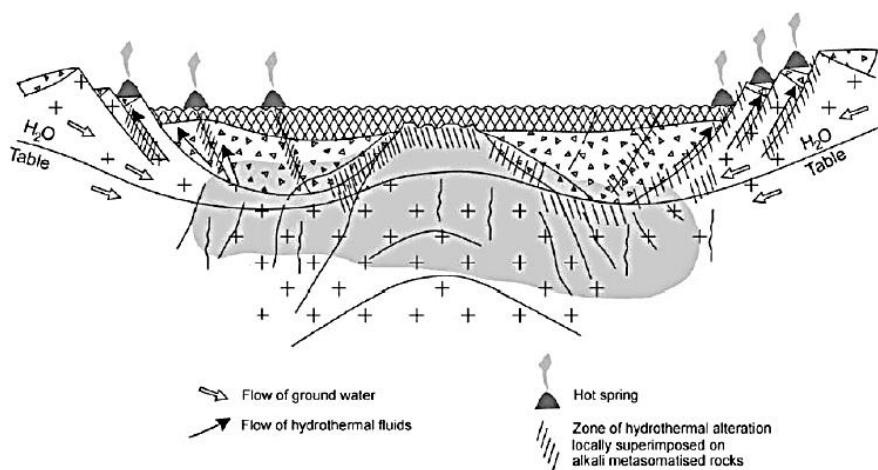


Imagen 28: Pirajno 2005, Geological Society of Australia. Fase 2. Modelo de la circulación de fluido hidrotermal en un cráter de impacto.

Dos de los ejemplos más estudiados actualmente son los cráteres Gusev y Gale, que han llegado a formar un edificio volcánico dentro del mismo cráter. El *Rover Curiosity* aterrizó dentro del cráter Gale y llevó a cabo diferentes análisis.

c) Distribución del agua

Uno de los principales retos a los que se enfrentan las futuras misiones a Marte es el de la obtención de agua líquida, esencial para el mantenimiento de la vida y el desarrollo tecnológico.

La teoría más aceptada por la comunidad científica dice que en un pasado, Marte pudo contener grandes depósitos de agua líquida en ríos, lagos y océanos (Llanuras del hemisferio norte) y que existía un ciclo del agua. Actualmente, las condiciones de bajas temperaturas y bajas presiones atmosféricas dificultan la existencia de agua en estado líquido. Se desconoce la causa exacta de esta transición, pero muchas teorías apuntan a la incidencia del viento solar con la atmósfera y la superficie del planeta.

Gracias a la sonda *Mars Odyssey* y su Detector de Neutrones de Alta Energía (HEND), se han elaborado mapas en los que se puede apreciar la interacción de la superficie marciana con la radiación ionizante, estrechamente relacionada con la abundancia de agua (ya sea en forma líquida, sólida o dentro de estructuras minerales). Los bajos niveles indican la presencia de una alta concentración de hidrógeno, interpretado como H_2O o minerales hidratados.

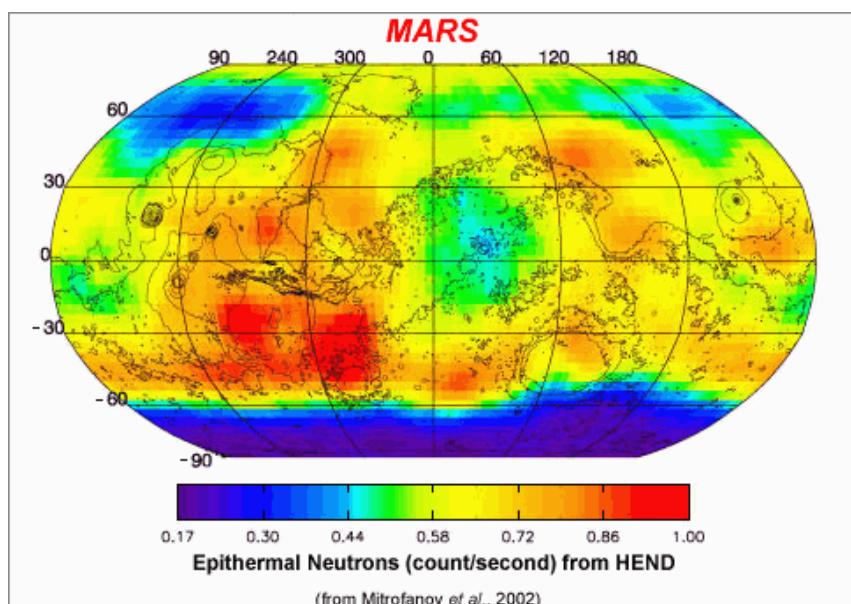


Imagen 29: NASA. Mapa de neutrones de alta energía emitidos y capturados por el HEND.

Cálculos teóricos llevados a cabo por el equipo del HEND (**Imagen 29**) predicen que las regiones del sur podrían contener depósitos de hielo bajo 60cm de la superficie.

Los datos obtenidos por el HEND se han comparado con los del Espectrómetro de Rayos Gamma de la misma sonda *Mars Odyssey* (GRS), obteniendo así un mapa de la distribución de agua en la superficie marciana. Nótese la coherencia de ambos análisis independientes.

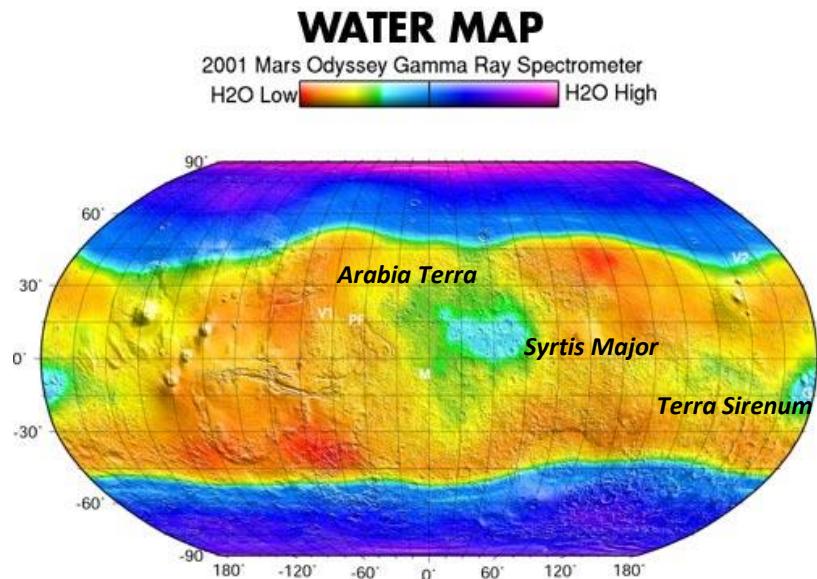


Imagen 30: NASA. Mapa de distribución de agua (hielo) de la superficie de Marte elaborado con datos del GRS de *la Mars Odyssey*.

A partir de los análisis del HEND y del GRS de la sonda *Mars Odyssey* se pueden ver claramente cuatro extensas zonas donde se puede encontrar agua: Llanuras del hemisferio norte (polo norte), regiones del hemisferio sur (polo sur), Arabia Terra – Syrtis Major y Terra Sirenum.

Estabilidad del agua líquida

Las actuales condiciones atmosféricas de Marte dificultan la existencia de agua líquida ya que el rango de temperaturas y presiones oscila entre los 15°C y los -120°C y las 0,02 atm y 0,005 atm, por lo que la fase líquida no es estable y el hielo sublima directamente a gas al aumentar la temperatura. Existe la posibilidad de encontrar agua líquida en depósitos subterráneos ya que aumentando la presión y la temperatura gracias al gradiente geotérmico, se den las condiciones necesarias para que la fase líquida sea estable.

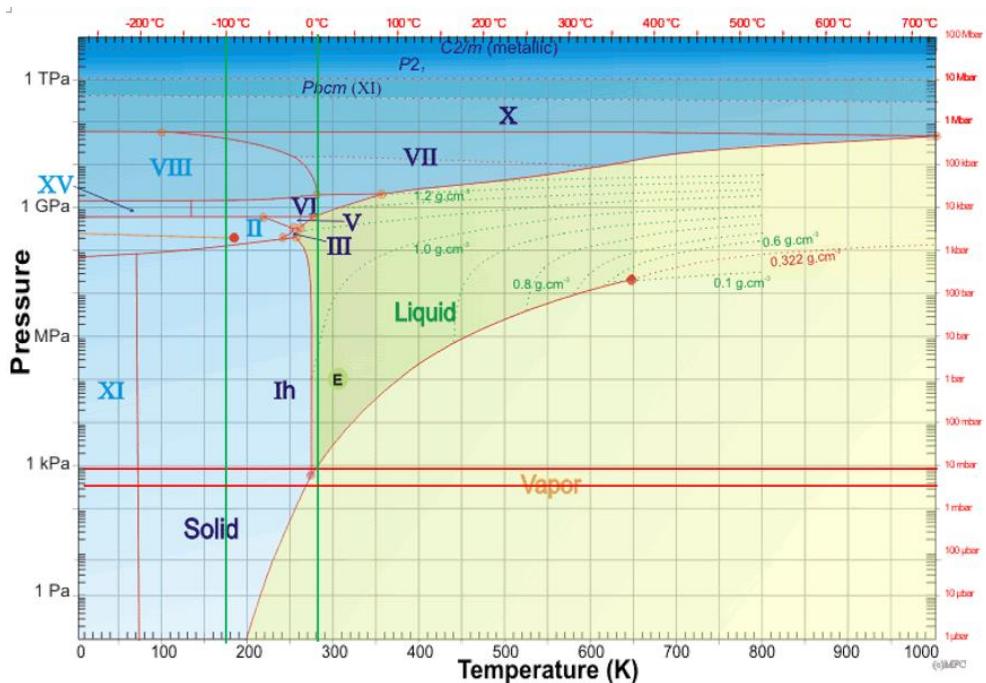


Imagen 31: Diagrama de fases del agua pura. Las rectas rojas y verdes indican los rangos de presión y temperatura respectivamente. Nótese que se puede llegar a dar el punto triple dentro de las condiciones ambientales.

El 28 de septiembre de 2015, la NASA publicó el descubrimiento de pequeños flujos de agua durante las estaciones más calidas. Usando fotografías del espectrómetro de la sonda Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), los investigadores detectaron trazas de minerales hidratados formando misteriosas vetas descendiendo por valles y laderas de varias montañas y cráteres. Estas vetas aparecían en temporadas cálidas y desaparecían durante las temporadas frías, de manera que se investigaron estos flujos con el tiempo. Estos flujos aparecen en varias regiones de Marte cuando las temperaturas se encuentran por encima de los -23°C , suficiente para que se pueda encontrar agua líquida con sales minerales disueltas que bajan su punto de congelación.

2.3.2 Mapa Geomorfológico

La geomorfología es una rama de la geología que tiene como objeto el estudio del relieve de la superficie de un planeta, entender su origen y su actual comportamiento.

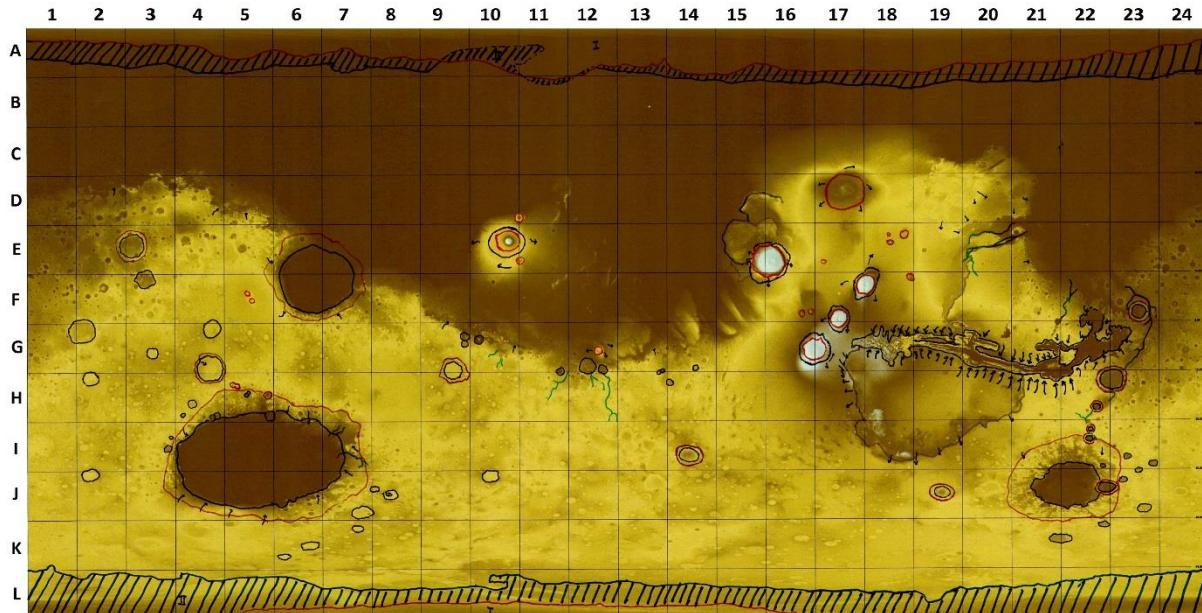


Imagen 32: M. Palos Pou. Mapa geomorfológico de Marte

A diferencia de una cartografía geológica la cual define y plasma los procesos geológicos en su generalidad, como la estructura interna de la tierra y su composición o su evolución a lo largo del tiempo, se presenta a continuación un mapeo geomorfológico elaborado a partir de la composición y unión de los datos MOLA. A partir de ellos se ha realizado manualmente el marcado de la morfología de la corteza y posteriormente escaneado.

Se ha incluido una leyenda de altitudes del mapa en archivo adjunto al trabajo y a continuación una leyenda de la morfología tratada en dicho mapa.

1. Volcanes y coladas volcánicas: Los volcanes son marcados en rojo mientras que las coladas de los de mayor tamaño en negro
2. Canales de erosión y drenaje: Verde
3. Glaciares y procesos glaciares: La región morada (I) cerrada indica agua congelada residual (H_2O en el polo norte y principalmente CO_2 en el polo sur). La región azul oscuro (II) indican zonas glaciares con tierra en forma minoritaria
4. Fallas y fosas tectónicas: Gris claro
5. Cráteres de impacto y aureolas de eyecta: Los cráteres son marcados en negro mientras que las aureolas de eyecta son marcadas en naranja-marrón

6. Flechas: Indican el movimiento de las tierras y erosión (de mayor a menor elevación)
7. Cañones y fracturas: negro

El foco del estudio y mapeo se centra en la región de los montes Tharsis, Hebrus Valles, Valle Marineris y alrededores; en los que se presentan mayores procesos geomorfológicos. Tenemos como objetivo finalizar próximamente la cartografía completa de la superficie Marciana por tal de poder elaborar indicaciones más precisas y concisas en un futuro. El manejo que aporta el formato impreso era imprescindible en esta presentación, pues los conocimientos de la cartografía Marciana de los que se disponía eran limitados.

2.3.3 Aplicaciones

A pesar de que algunas propiedades como el módulo elástico o la conductividad térmica varían con la temperatura, se puede predecir de modo cualitativo las propiedades que deben poseer los materiales de la corteza, para la estabilidad de asentamientos o aterrizajes y las propiedades de ellos en futuras construcciones. A partir de la recopilación de datos¹ se presenta a continuación un estudio de cómo afectan las características térmicas y mecánicas al comportamiento de la materia en marte.

	Densidad (kg/m ³)	Módulo elástico (GPa)	Coeficiente de expansión térmica volumétrico (x10 ⁻⁵)	Conductividad térmica (W/m K)	Calor específico (J/kg K)
Piroxeno	3275	175	2.6	4.6	823
Plagioclasa	2665	85	1.2	2	1081
Hormigón	2200	-	0.8-1.2	1.4	837
Acero	7850	-	1.2	47-58	460
Aluminio	2700	-	2.4	209-232	909
Vidrio	2700	-	0.05-0.9	0.81	833

Tabla 2: Propiedades mecánicas y térmicas de materiales. Algunos de ellos presentan Módulo Elástico variable y poco indicativo de la realidad, por lo que no se indica.

¹ J.L. Molero 2013 , *Grain-scale thermoelastic stresses and spatiotemporal temperature gradients on airless bodies, implications for rock breakdown*.

¹ Wikipedia



En relación al piroxeno y la plagioclasa se ve que la menor densidad del segundo favorece a que, al haber menor densidad atómica y mayor cantidad de zonas de vacío o aire, el choque interatómico al expandirse y contraerse sea menor. Así, pues, su menor coeficiente de expansión térmica y menor conductividad térmica (ambos menos de la mitad respecto al piroxeno) definen a la plagioclasa como el mineral idóneo en la composición de la superficie pues su fractura y grietas por estrés térmico son menores.

En cuanto al Aluminio, mientras que su baja densidad favorecería su uso, su alto coeficiente de expansión térmica (semejante al del Piroxeno) y conductividad térmica (dos órdenes de magnitud mayor), dificultan su aplicación. Sin embargo, podría ser útil en asentamientos fijos, donde el gradiente de temperaturas entre el día y la noche no fuera elevado.

En cuanto a los primordiales de construcción aquí en la tierra, Acero y Hormigón, el segundo presenta una densidad de una cuarta parte la del acero y un coeficiente de expansión térmica algo menor, así como una conductividad térmica mínima. El acero, además, en presencia de unas temperaturas altamente por debajo de los 4°C, se convierte en un material frágil y quebradizo. El hormigón, pues, tomaría un papel relevante.

2.3.3.1 Comparación de la habitabilidad de las regiones

En este apartado, se comparan cualitativamente las diferentes regiones de Marte, seleccionadas previamente, en función de las distintas características geológicas, atmosféricas y físicas que influirían en el desarrollo de misiones tripuladas y futuros asentamientos. Para elaborar esta tabla, previamente se han estudiado detenidamente estas características en los apartados anteriores.

A cada región de interés se le ha asignado un número diferente y le corresponde un determinado sector del mapa geomorfológico mostrado a continuación (y ampliado en el anexo).

Numeración	Hemisferio	Sectores	Región
1	Norte	D15 – G17	<i>Tharsis Montes y Olympus Mons</i>
2	Norte	D22 – E23	<i>Acidalia Planitia y Chryse Planitia</i>
3	Norte	C6 – E9	<i>Utopia Planitia</i>
4	Norte	D10 – G12	<i>Elysium Mons y Elysium Planitia</i>
5	Norte	C12 – G14	<i>Arcadia Planitia y Amazonis Planitia</i>
6	Norte	D1 – G3	<i>Arabia Terra</i>
7	Sur	I4 – J7	<i>Hellas Planitia</i>
8	Sur	J21 – J22	<i>Agyre Planitia</i>
9	Sur	G18 – G23	<i>Valles Marineris</i>
10	Sur	H13 – K16	<i>Terra Sirenum</i>
11	Sur	H17 – I20	<i>Solis Planum</i>
12	Sur	I1 – J2	<i>Noachis Terra</i>

Tabla 3: Localización de Regiones respecto al mapa Geomorfológico

Las características que se estudian en esta comparativa se estudian en los anteriores apartados de este proyecto y son las siguientes:

- Temperatura: esencial para el sostenimiento de la vida y el correcto funcionamiento de los equipos. Se han buscado las zonas con temperaturas más altas y con cambios lo menos abruptos posibles entre día y noche.
- Tormentas de polvo: estas nubes formadas por partículas de polvo levantado por el viento son un inconveniente ya que pueden producir desgaste en estructuras, equipos e interferencias en las comunicaciones por lo que se considera como buena la ausencia de estas tormentas.
- Protección del viento solar: la incidencia de las partículas ionizantes procedentes del viento solar es un gran peligro para la vida. Por lo tanto es importante buscar zonas protegidas de estas partículas por campos magnéticos superficiales o por la ionosfera.
- Radiación cósmica: la radiación electromagnética también afecta al desarrollo de organismos vivos y al funcionamiento de dispositivos electrónicos. Es importante

buscar localizaciones donde exista una menor incidencia de este tipo de radiación de alta energía (UV, Rayos X y Gamma).

- Estabilidad geológica: a la hora de escoger un asentamiento permanente es importante conocer los posibles peligros que pueden provocar diferentes procesos geológicos tales como desprendimientos, corrimientos de tierra, erupciones volcánicas, fallas, etc.
- Desplazamiento por tierra: a la hora de desplazarse por las inmediaciones del asentamiento, ya sea para extraer recursos como para explorar nuevas regiones, los vehículos deben tener facilidad para desplazarse por la superficie. Por lo tanto un terreno muy accidentado puede causar serios problemas.
- Recursos minerales: la obtención de recursos minerales permitirá el desarrollo del asentamiento de una manera autosuficiente tanto en la producción de metales, cerámicas y en la construcción de edificios e infraestructuras. Se considera como buena la región con posibles yacimientos y se considera regular la región con yacimientos a una distancia moderada.
- Abundancia de agua: el agua líquida es un recurso clave para el desarrollo de la vida y de ciertos materiales como el hormigón. La explotación de los recursos hídricos de Marte será un gran reto para las futuras misiones ya que su distribución no es del todo uniforme. Se considera como buena la región con abundancia de agua en la corteza (mayoritariamente en forma sólida).

B - Buena R - Regular M - Mala

Característica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperatura	R	B	B	B	B	R	M	M	R	M	R	R
Tormentas de polvo	M	B	R	M	M	M	R	R	B	R	R	B
Protección del viento solar	M	R	M	M	M	R	R	M	R	B	R	M
Radiación cósmica	M	B	B	R	B	R	B	B	B	M	M	M
Estabilidad geológica	M	B	M	M	B	B	B	B	M	B	M	B
Desplazamientos por tierra	M	B	R	R	R	R	M	M	M	B	R	B
Recursos minerales	B	R	R	B	R	B	B	B	B	M	B	M
Abundancia de agua	R	R	R	R	B	B	R	M	M	R	M	R

Tabla 4 Comparativa de Regiones

La región que destaca en esta comparativa y que hemos seleccionado como mejor localización para establecer un asentamiento es Chryse Planitia y Acidalia Planitia (2).

2.3.3.2 Materiales de uso potencial

Las características químicas y físicas de Marte tan diferentes a las de la Tierra hacen replantar los materiales ingenieriles que se usarán en futuras misiones y asentamientos en el planeta rojo. Una fina atmósfera rica en CO₂, una inferior fuerza de atracción gravitatoria, extremados ciclos térmicos y una fuerte incidencia de la radiación solar condicionan las propiedades y las aplicaciones de los materiales que producimos actualmente en la Tierra.

Metales

Los metales y sus aleaciones son la base del desarrollo tecnológico y están presentes en infinidad de aplicaciones. Los metales más utilizados son el acero y el aluminio gracias a la abundancia de minerales en la corteza y de disponer de buenas propiedades mecánicas.

Los metales en Marte soportarían condiciones de trabajo mucho más extremas que en la Tierra, por lo tanto, es importante saber si sus propiedades se ven modificadas por el ambiente. La composición química de la atmósfera y la temperatura serán los principales factores que influyan en su comportamiento en servicio mientras que, en el caso específico de los metales, la radiación electromagnética del viento solar no les afectará notablemente. En este apartado se comentarán el acero, el aluminio y el plomo.

- El acero

El acero (hierro con un pequeño porcentaje de carbono disuelto), se considera el rey de los metales por su abundancia, unas muy buenas propiedades mecánicas. De todos modos, también tiene puntos débiles que dificultan su aplicación: la corrosión y el trabajo a bajas temperaturas.

Propiedad	Acero 1040
Límite elástico (σ_P)	600 MPa
Módulo de Young (E)	200 000 MPa
Resistencia al impacto	180 J
Coeficiente de expansión lineal (α)	$1.2 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Densidad	7850 kg/m ³

Tabla 5: Wikipedia. Propiedades mecánicas del acero al carbono 1040.

La corrosión del acero en Marte se produce en una atmósfera prácticamente compuesta de CO₂. Este tipo de corrosión depende de la temperatura y la humedad, entre otras variables. El mecanismo de oxidación mediante dióxido de carbono tiende a producir carbonatos de hierro que pueden llegar a convertirse en óxidos de hierro. Según los diagramas de equilibrio de Chaudron (**Imagen 33**), la especie más estable a temperaturas bajas y una fracción molar de monóxido de carbono (CO) inferior al 1% (en Marte es aproximadamente de $8.4 \cdot 10^{-4}\%$) es la magnetita (Fe₃O₄).

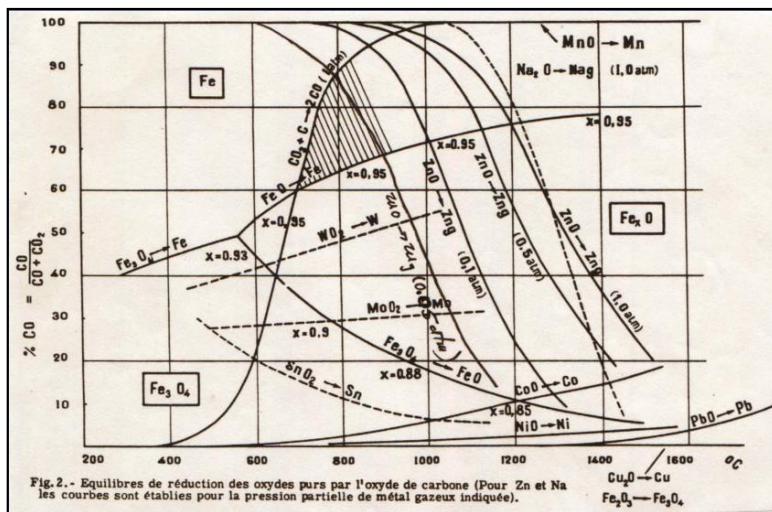


Imagen 33: Diagrama de Chaudron

En la Tierra, este tipo de corrosión se produce en aceros de baja aleación de la maquinaria de extracción petrolífera y canalizaciones industriales donde se produce este gas. Para minimizar los efectos de la corrosión por CO₂ se pueden utilizar aleaciones con cromo (3CrA y 3CrB) que reducen notablemente la velocidad de corrosión y recubrimientos cerámicos aptos para trabajar a muy bajas temperaturas.

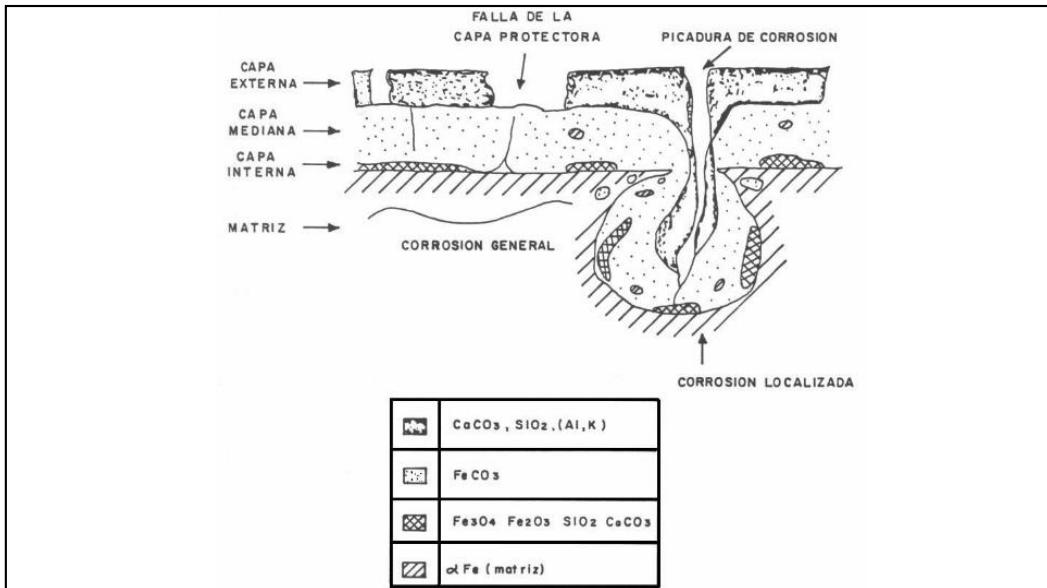


Imagen 34: Esquema de corrosión por CO_2

La transición dúctil-frágil es marcada en los metales y aleaciones que presentan un punto de fluencia agudo, sobre todo en aquellos en que el punto de fluencia aumenta a medida que disminuye la temperatura. Las bajas temperaturas de la atmósfera marciana también dificultarán la aplicación del acero. Muchos tipos de acero presentan una transición dúctil-frágil muy abrupta por debajo de los 4°C, de modo que los aceros deberán trabajar evitando impactos para no romperse por fragilidad pese a presentar una resistencia a la tracción excelente. Una interesante aplicación es el hormigón armado, del que se hablará en los próximos apartados.

- El aluminio

Propiedad	Aluminio 2048
Límite elástico (σ_p)	145 MPa
Módulo de Young (E)	70 000 MPa
Resistencia al impacto (Ensayo Charpy)	10,3 J
Coeficiente de expansión lineal (α)	2.4×10^{-5}
Densidad	2700 kg/m ³

Tabla 6: Wikipedia. Propiedades del Aluminio 2048.

El aluminio destaca sobre el acero en cuanto a ligereza, cualidad que lo hace idóneo en la construcción de vehículos terrestres y aéreos. Además, teniendo en cuenta las bajas temperaturas de Marte, no se vería prácticamente perjudicado mecánicamente ya que los

metales con estructura cúbica centrada en las caras (FCC) no presentan generalmente la transición dúctil-frágil que se da en los aceros.

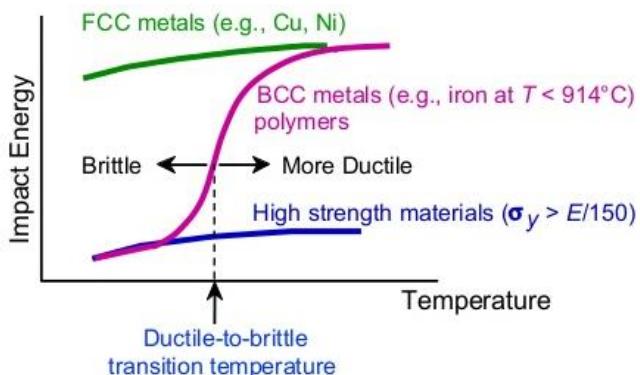


Imagen 35: Esquema del punto de transición dúctil-frágil en diferentes materiales.

Otro de los usos potenciales del aluminio se centra en la producción de otros metales. La alta capacidad reductora del aluminio metálico permite reducir los óxidos de otros metales menos reactivos como el cobre y el hierro (que comúnmente se reducen mediante procesos pirometalúrgicos) en vistas a la ausencia de yacimientos de carbón ya que el aluminio se obtiene por electrolisis de sus sales fundidas (no requiere de aportación de un reductor).

- El plomo

Actualmente, el plomo no es un metal con una elevada demanda debido a su poca utilidad en las aplicaciones tecnológicas que conocemos. Su elevada densidad y malas propiedades mecánicas no lo hacen útil para estructuras que tengan que soportar cargas o impactos. Pese a no ser ni resistente a la tracción ni duro, presenta una característica poco común: es un excelente aislante de la radiación electromagnética. El plomo se usa principalmente como aislante en generadores nucleares, instalaciones de residuos radioactivos y protección de operarios que trabajan con rayos X.

La alta densidad del plomo está relacionada con una nube electrónica muy densa que es capaz de frenar la radiación gamma (γ) haciendo que pierda energía al interactuar con los electrones. Esta radiación gamma se va descomponiendo hasta llegar al espectro infrarrojo a medida que avanza a través del bloque de plomo haciendo aumentar su temperatura.

El principal peligro para los seres vivos en Marte es la incesante radiación de alta energía y bombardeos de partículas ionizadas provenientes del viento solar. Construcciones y

materiales compuestos con plomo garantizarían una excelente protección para los organismos vivos de estas letales dosis de radiación.

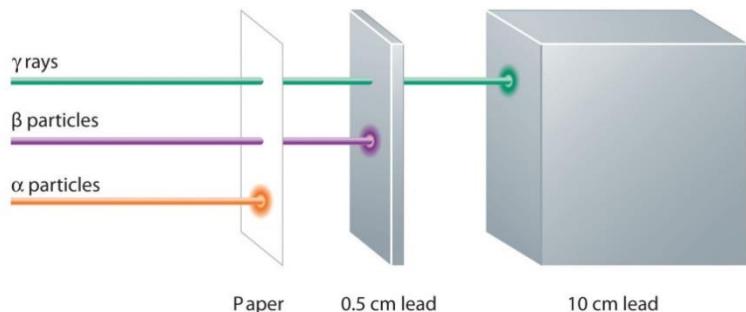


Imagen 36: Transmisión de la radiación a través de distintos materiales. Se observa que la trayectoria de los rayos Gamma no es desviada.

Otra aplicación interesante para el plomo es el del almacenamiento de energía eléctrica en baterías de plomo-ácido en ausencia de alternativas más eficientes.

Cerámicos

Los materiales cerámicos convencionales son utilizados principalmente en construcciones debido a su fácil producción, bajo coste y buenas propiedades mecánicas (excepto bajo esfuerzos de tracción). Las tres principales familias que se tratan en este apartado son los ladrillos sinterizados, el hormigón y el vidrio.

- Bloques sinterizados de polvo

Diferentes proyectos han propuesto un sistema de construcción de edificios basados en la compactación y el sinterizado de las partículas de polvo tan abundantes en ciertas zonas del planeta. Dicho sistema puede generar pequeños edificios provisionales de una forma rápida y sencilla. Este método de construcción se encuentra actualmente en fase de desarrollo.

- Hormigón

El hormigón es el pilar base de la construcción moderna. Está compuesto principalmente compuesto por cemento $[(\text{SiO}_2)(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{CaO})]$, áridos (grava y piedras) y agua. Estos elementos son fáciles de obtener ya que son muy comunes en las cortezas terrestre y marciana.

Durante su producción, permite ser conformado en moldes y una vez fraguado mantiene unas buenas propiedades frente a condiciones meteorológicas extremas. Además posee una propiedad que será esencial para el mantenimiento de los seres vivos en un asentamiento en Marte: el agua que hidrata el cemento absorbe las radiaciones de alta

energía (rayos X y Gamma), de modo que ofrece una muy buena protección contra las radiaciones cósmicas que inciden en la superficie.

Una manera de mejorar las propiedades mecánicas (sobre todo respecto a esfuerzos de tracción) es armarlo alrededor de una estructura de acero, que le aporta una mayor rigidez. Este hormigón armado se puede conformar en fábricas y las piezas prefabricadas permiten construir grandes infraestructuras rápidamente.

- Vidrio

El Vidrio corriente se compone principalmente de Sílice (SiO_2), Sosa (Na_2O) y Cal (Ca_2O) provenientes de sus correspondientes carbonatos. Es un material duro, transparente y frágil a los impactos. La transparencia es su propiedad más importante ya que nos permite fabricar ventanas de edificios, vehículos y utensilios varios. Existen diferentes variedades de vidrio: de Sílice puro, de Sílice-cal-sosa, Borosilicato, Aluminosilicato y Vidrio de Plomo. Cabe destacar esta última variedad ya que posee una característica aplicable a las condiciones ambientales.

El Vidrio de Plomo, álcali y silicato, se compone principalmente de SiO_2 (30 – 70 %), PbO (18 – 65 %), Na_2O y/o K_2O (5 - 20 %). El óxido de plomo le aporta una gran densidad y se utiliza para proteger de la radiación de alta energía y para ventanas de radiación -absorben los rayos X y Gamma-, carcasa de lámparas fluorescentes y lámparas de televisión. El principal inconveniente que presentan estos vidrios es el de ser más blandos que los de sodio y calcio. Esta clase de vidrio puede ser útil a la hora de construir ventanas en edificios y vehículos que protejan a los habitantes de la radiación ionizante.

Polímeros

Los polímeros son la tercera gran familia de los materiales y, no por eso, la menos importante. Prácticamente todos provienen de los derivados de la industria petroquímica, por lo que no podrían producirse íntegramente en Marte debido a la falta de materias primas (se desconoce la existencia de reservas de petróleo en la corteza marciana).

Los polímeros presentan un gran abanico de propiedades en función de su composición química y su estructura molecular. Dos características que resultan interesantes desde el punto de vista tecnológico en un asentamiento mariano son el punto de transición vítrea (la plasticidad es dependiente de la temperatura) y la concentración de átomos de hidrógeno, que permite la absorción de radiación de alta energía. Polímeros como el HDPE (polietileno de alta densidad) que presentan una gran densidad de hidrógenos se pueden emplear en estructuras ligeras y ropa protectora contra la radiación.



Material	No. Hydrogen Atoms Per cm ³ ($\times 10^{22}$)	No. Hydrogen Atoms Per g ($\times 10^{22}$)
Hydrogen (solid; liquid)	5.7; 4.5	59.7; 59.7
Water	6.7	6.7
Lithium hydride	5.9	7.6
Pure polyethylene (PE)	8.9	8.6
5% borated PE	6.6	8.2

Tabla 6: NASA. Contenido de hidrógeno de diferentes compuestos y materiales.

3. Conclusión

Desde antiguos lechos fluviales hasta colosales volcanes que se extinguieron en un tiempo pasado. Un planeta fantasma que alberga aun en sus adentros la historia de una tierra fascinante. Una luz en el Universo que se fue apagando lentamente por causas cuyo conocimiento es incompleto y buscamos incesantemente conocer.

Desde sus condiciones climáticas y geológicas impiadosas hasta la posibilidad de acoger vida hacen de Marte la esencia del conocimiento de todo lo que nos rodea. ¿Qué llevó a Marte a tal estado?, ¿Está la tierra evolucionando en esa dirección?

Son preguntas que forman parte de un puzzle aun sin completar y, a partir de las cuales, hemos podido aportar nuestra pieza entre las cientos de miles que distan de concluirlo.

La propuesta de la fatiga térmica y la fragilidad como causantes de una corteza fracturada ha dado explicación a la morfología de su superficie. Así, pues, su extrapolación a los materiales de uso en futuras exploraciones espaciales y el estudio de regiones, ha permitido su aplicación en el ámbito tecnológico.

Al iniciarnos en éste camino, se buscaba algo a cambio, y parece que ha dado de su parte. Sumergiéndonos en la ciencia espacial hemos aprendido a ver nuestro estudio universitario desde un punto de vista nuevo, Universal. Y, así mismo, ha abierto las puertas a la investigación.

BIBLIOGRAFIA

- Atkins and Jones 2012, Principios de Química, 5^a edición, Madrid: Editorial Medica Panamericana.
- Borgia, Andrea et al. 2010, *Is Tharsis Rise, Mars, a spreading volcano?*, The Geological Society of America, Paper 470.
- Brown, Adrian et al. 2008, *Louth Crater: Evolution of a layered water ice mound*.
- Christensen, Philip R., et al. 2003, "Morphology and Composition of the Surface of Mars: Mars Odyssey THEMIS Results, *Science*, vol. 300
- Clifford and Parker. 2001, *The Evolution of the Martian Hydrosphere: Implications for the Fate of a Primordial Ocean and the Current State of the Northern Plains*, Estados Unidos.
- D. Callister, William 1995, *Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales*, Reverté.
- González de Vallejo, Luis 2002, *Ingeniería Geológica*, Pearson Educación.
- Gooding, James L. 1977, *Chemical Weathering on Mars Thermodynamic Stabilities of Primary Minerals (and Their Alteration Products) from Mafic Igneous Rocks*
- Grant, J. et al. 2004, *Surficial deposits at Gusev crater along Spirit rover traverses*, *Science*, vol. 305
- Grotzinger, John P. 2012, "Analisis of Surface Materials by the Curiosity Mars Rover", *Science*, vol. 341
- H.Y McSween, Jr. et al. 2003 , "Mars (capítulo 1.22)" en *Treatise of geochemistry, San Diego*.
- Hamilton, Calvin J., "Martian Volcanoes"
<http://astro.if.ufrgs.br/solar/marsvolc.htm>
- Howell, Elizabeth 2015, Space.com, "The Martian Dust Storm Would Actually be a Breeze", <http://www.space.com/30663-the-martian-dust-storms-a-breeze.html>
- JG Sánchez, José Antonio Maza Álvarez, "Morfología de Ríos", en Instituto de Ingeniería, Unam, *Manual de Ingeniería de Ríos* (Cap. 11), México.
- McKay, C. P., Molaro, J. L. & Marinova, M. M. 2009, *High-frequency rock temperature data from hyper-arid desert environments in the Atacama and the Antarctic dry valleys and implications for rock weathering*, *Journal of Geophysical Research*, 110, 180-187

- Molaro, J. & Byrne, S. 2012, *Rates of temperature change of airless landscapes and implications for thermal stress weathering*, Journal of Geophysical Research, vol. 117
- Molaro, Jamie 2013, *Grain-scale thermoelastic stresses and spatiotemporal temperature gradients on airless bodies, implications for rock breakdown*
- NASA 2008, *The radiation Challenge*.
- NASA, *The gamma ray spectrometer*,
<http://mars.nasa.gov/odyssey/mission/instruments/grs/>
- Organización Mundial de la Salud 2012, *Radiaciones Ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección*,
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/>
- Perez Ipiña 2007, *Transición Ductil-Fragil de Aceros Férricos. Algunos aspectos todavía abiertos*
- Phillips, Tony, NASA 2001, *The Solar Wind at Mars*
- Sciencelearn.org 2010, “Types of volcanic rock”,
<http://sciencelearn.org.nz/Contexts/Volcanoes/Science-Ideas-and-Concepts/Types-of-volcanic-rock>
- Striker, C.R, et al. 1993, *The Physical and Chemical Properties and Resource Potential of Mars Surface Soils*
- Taylor, G. Jeffrey 2002, *Dirty Ice on Mars*
- Taylor, G. Jeffrey, et al. 2006, *Mapping Mars Geochemically*
- Viglienzon Martel, Linda Marie 2011, *Timeline of Martian Volcanism*
- West, Michael D. and Clarke, Jonathan D.A 2009, *Potential Martian mineral resources: Mechanisms and terrestrial analogues*
- Williams, David R., NASA, *Mars Fact Sheet*,
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>

ANEXO



Imagen Anexo 1: Meridiani Planum. Opportunity. Imagen adicional la cual muestra la fragilidad rocosa en marte

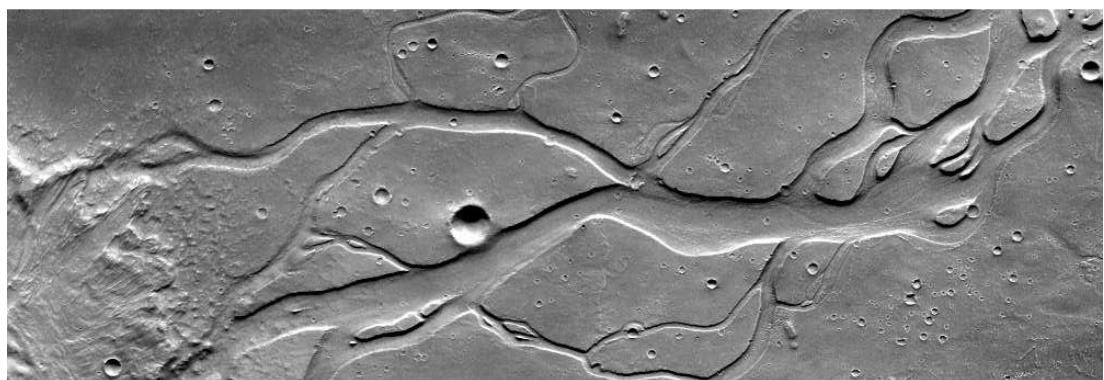


Imagen Anexo 2: THEMIS. Hebrus Vallis. Sinusoidalidad como indicativo de antiguos canales.

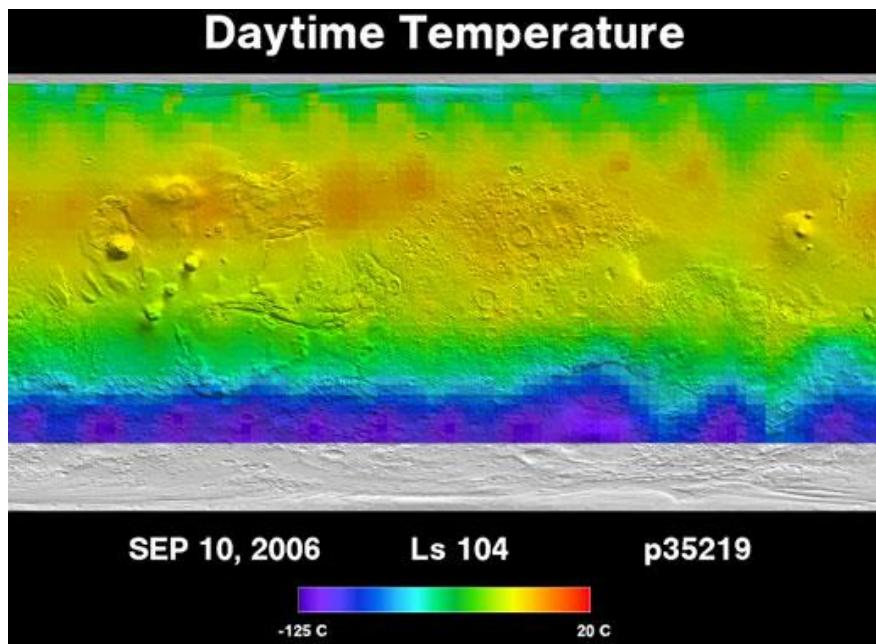


Imagen Anexo 3: Distribución de las temperaturas durante el día Marciano.

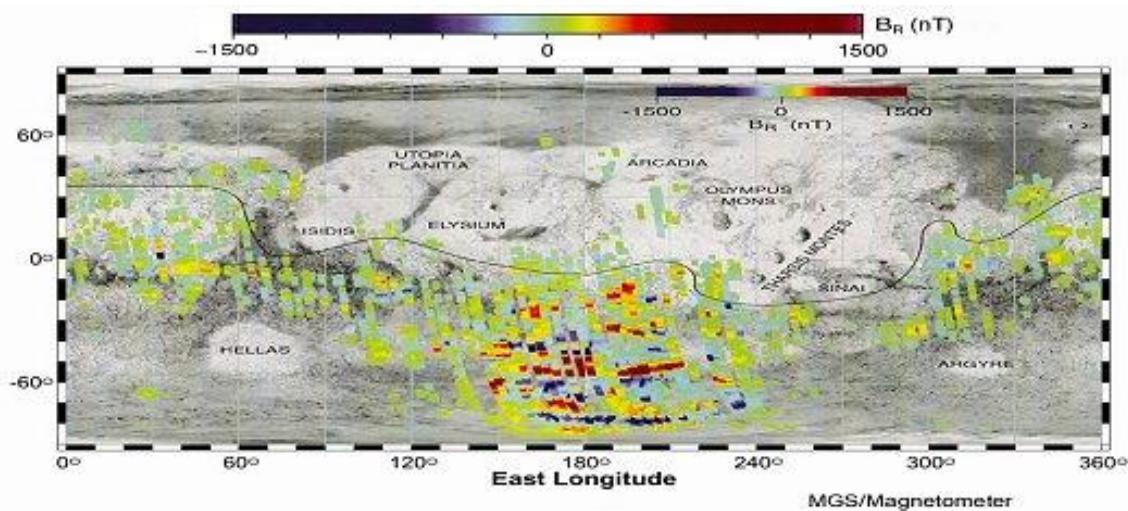


Imagen Anexo 4: Muestra el magnetismo remanente en la superficie de Marte

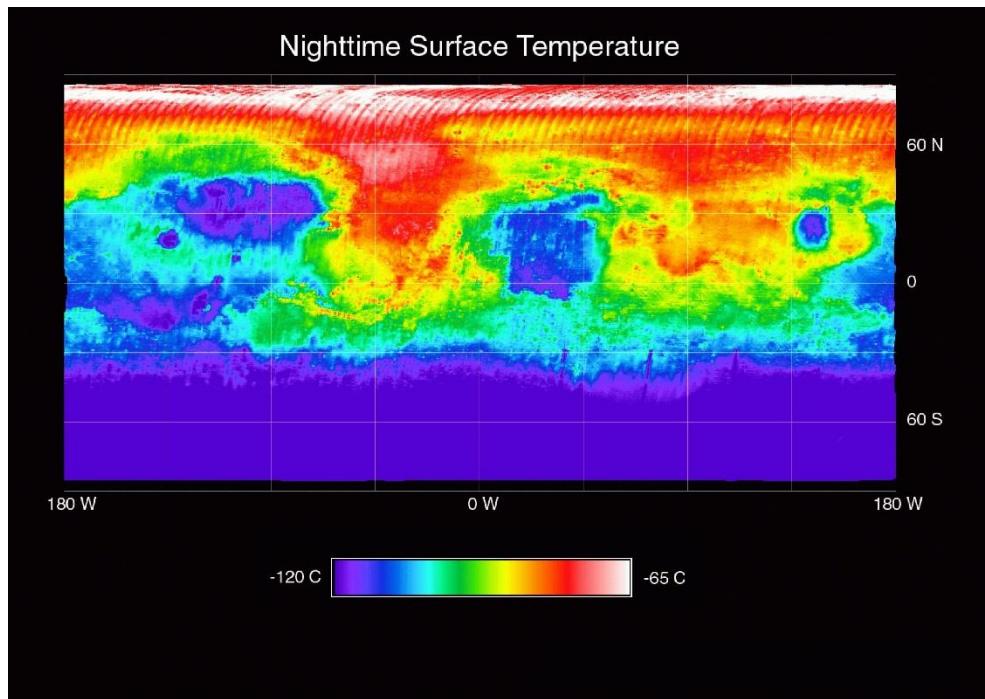


Imagen Anexo 5: Distribución de las temperaturas nocturnas en la superficie de Marte

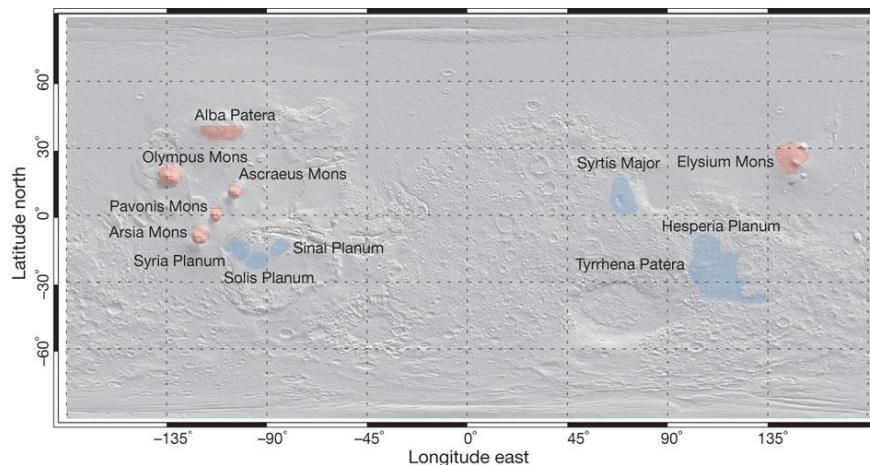


Imagen Anexo 6: Mapa del volcanismo de Marte. En azul, regiones volcánicas Hesperia. En rojo, los mayores volcanes de tipo escudo (más recientes). Autores: [David Baratoux](#), [Michael J. Toplis](#), [Marc Monnereau](#) & [Olivier Gasnault](#).

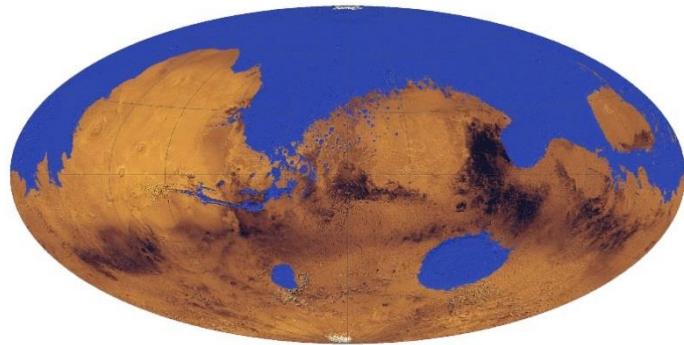


Imagen Anexo 7: Recreación teórica de los lagos y océanos que en un pasado cubrieron Marte.

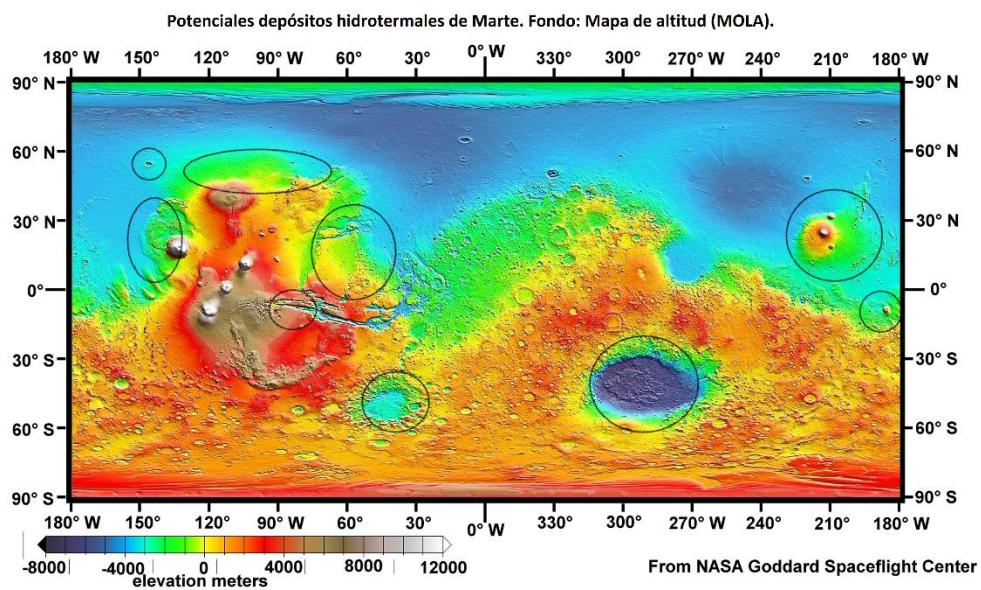


Imagen Anexo 8: NASA. Distribución de los depósitos hidrotermales en Marte.